

## **INFORMATION TO USERS**

**This manuscript has been reproduced from the microfilm master. UMI films the text directly from the original or copy submitted. Thus, some thesis and dissertation copies are in typewriter face, while others may be from any type of computer printer.**

**The quality of this reproduction is dependent upon the quality of the copy submitted. Broken or indistinct print, colored or poor quality illustrations and photographs, print bleedthrough, substandard margins, and improper alignment can adversely affect reproduction.**

**In the unlikely event that the author did not send UMI a complete manuscript and there are missing pages, these will be noted. Also, if unauthorized copyright material had to be removed, a note will indicate the deletion.**

**Oversize materials (e.g., maps, drawings, charts) are reproduced by sectioning the original, beginning at the upper left-hand corner and continuing from left to right in equal sections with small overlaps.**

**Photographs included in the original manuscript have been reproduced xerographically in this copy. Higher quality 6" x 9" black and white photographic prints are available for any photographs or illustrations appearing in this copy for an additional charge. Contact UMI directly to order.**

**ProQuest Information and Learning  
300 North Zeeb Road, Ann Arbor, MI 48106-1346 USA  
800-521-0600**

**UMI<sup>®</sup>**

**UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE**

**Faculté de génie  
Département de génie électrique  
et de génie informatique**

**DÉVELOPPEMENT DE LA FABRICATION DES DISPOSITIFS  
LASERS POUR LES TÉLÉCOMMUNICATIONS**

**Mémoire de maîtrise es génie  
Spécialité: génie électrique**

**Imen ARFAOUI**

**Sherbrooke (Québec), CANADA**

**Avril 1999**

IV - 1161



**National Library  
of Canada**

**Acquisitions and  
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada**

**Bibliothèque nationale  
du Canada**

**Acquisitions et  
services bibliographiques**

**395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada**

*Your file Votre référence*

*Our file Notre référence*

**The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.**

**The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.**

**L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.**

**L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.**

**0-612-67683-8**

**Canada**

## Résumé

L'amélioration de la qualité des circuits photoniques est l'un des défis majeurs de la micro-électronique pour augmenter les débits d'information dans les fibres optiques et diminuer leurs facteurs de pertes. Dans ce mémoire, des méthodes de développement de la fabrication des dispositifs lasers pour les télécommunications sont présentées. Le but de ces recherches est de diminuer le courant de seuil et de favoriser une fonctionnalité adéquate en alimentation continue des dispositifs lasers. Un procédé efficace de fabrication consiste à appliquer une gravure humide dans le but d'augmenter les performances des dispositifs lasers, fabriquer des dispositifs lasers monomodes à courant de seuil assez bas et permettre une intégration des composants photoniques sur le même circuit électronique. Une grande partie de ce travail consiste à étudier l'impact de la gravure humide sur des échantillons lasers qui ont subi différents procédés lithographiques. Ensuite, des diodes lasers à différentes largeurs de raies d'injection ont été fabriquées dans le but d'interpréter la variation du courant de seuil. Finalement, la distribution spatiale de l'intensité lumineuse des diodes lasers fabriquées à l'aide d'un montage qu'on a réalisé est étudiée. Le procédé de la gravure humide ainsi que les différentes méthodes de fabrication et de caractérisation sont expliqués en détails dans les chapitres qui suivent. Les résultats et les caractéristiques des composants obtenues sont discutés et exposés dans la dernière partie de ce travail.



## Remerciements

Mon projet de maîtrise intitulé: *développement de la fabrication des dispositifs lasers pour les télécommunications*, s'est élaboré dans une atmosphère réconfortante au sein du Groupe de Micro-électronique de l'Université de Sherbrooke (GMS) et en particulier dans le groupe d'optoélectronique.

Je tiens tout d'abord à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de recherche, Jacques Beauvais, pour sa contribution remarquable et ses conseils fructueux à la réussite et au bon déroulement de ce projet.

J'adresse mes vifs remerciements à mes deux collègues du groupe d'optoélectronique: Michel Paquette et Vincent Aimez qui m'ont permis de bénéficier de leurs aides consistantes et de partager leur expérience acquise au cours de leurs travaux de recherche.

Je remercie toute personne contribuant à la réussite de ce projet: Pierre Lafrance, Jacques Corbin et Pierre Langlois pour leur soutien technique et pour leurs conseils judicieux, tout le personnel du Conseil National de Recherche du Canada qui a participé à la croissance épitaxiale du matériau laser que j'ai utilisé au cours de mes travaux, tous nos collègues du département de physique et à leur tête Jean Beerens le responsable du laboratoire où j'ai réalisé les tests de caractérisation.

Je suis très reconnaissante pour les membres du GMS: Éric Lavallée, Sébastien Michel, Dominique Drouin et Célin Aktik pour leur aide pertinente et enrichissante le long de mes travaux.

# Table des matières

1. INTRODUCTION .....	1
2. ÉTUDES THÉORIQUES DES PROCÉDÉS DE FABRICATION .....	3
2.1. Introduction .....	3
2.2. Lasers semi-conducteurs .....	3
2.2.1. Gain d'un laser semi-conducteur .....	9
2.2.2. Courant de seuil d'un laser semi-conducteur .....	10
2.3. Lasers semi-conducteurs à puits quantiques .....	12
2.3.1. Gain optique .....	16
2.3.2. Courant de seuil .....	18
2.4. Lithographie par faisceaux d'électrons .....	20
2.4.1. Description du microscope électronique à balayage et du logiciel utilisé .....	21
2.4.2. Description de la résine .....	23
2.5. Techniques de croissances épitaxiales .....	24
2.6. Procédés de gravure humide sur les matériaux lasers .....	26
2.6.1. Paramètres caractéristiques des gravures humides .....	27
2.7. Conclusion .....	30
3. TECHNIQUES DE FABRICATION .....	31
3.1. Introduction .....	31
3.2. Propriétés du matériau laser .....	31
3.2.1. Critères de choix .....	31
3.2.2. Propriétés physiques .....	32

3.2.3. Avantages de l'InP pour la fabrication des diodes lasers	33
3.2.4. Structure	33
3.3. Étapes de fabrication	36
3.3.1. Recettes de nettoyage	36
3.3.2. Dépôt du SiO <sub>2</sub> par PECVD	36
3.3.3. Lithographie par faisceaux d'électrons	37
3.3.3.1. Design des masques et alignement	38
3.3.3.2. Développement	42
3.3.4. Photolithographie	42
3.3.4.1. Design des masques	44
3.3.4.2. Exposition optique et développement	44
3.3.5. Recettes de gravure	45
3.3.6. Amincissement	48
3.3.7. Contacts	48
3.3.7.1. Contact Ohmique	48
3.3.7.2. Contact Schottky	49
3.3.8. Recuit d'alliage	50
3.3.9. Clivage	50
3.3.10. Caractérisation	51
3.3.10.1. Photoluminescence	51
3.3.10.2. Électroluminescence	53
3.4. Conclusion	53
4. DISCUSSIONS DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX	55
4.1. Introduction	55
4.2. Résultats de la gravure humide	55

4.2.1. Résultats de la lithographie par faisceaux d'électrons .....	57
4.2.2. Résultats de la photolithographie .....	58
4.3. Fabrication des diodes lasers à différentes largeurs de lignes .....	62
4.3.1. Lasers à 27 $\mu\text{m}$ de largeur de ligne .....	62
4.3.2. Lasers à 30 $\mu\text{m}$ de largeur de ligne .....	64
4.3.3. Lasers à 8.3 $\mu\text{m}$ de largeur de ligne .....	65
4.3.4. Interprétations .....	67
4.4. Mesures des distributions spatiales de l'intensité lumineuse .....	67
4.5. Conclusion .....	71
CONCLUSION .....	73
RÉFÉRENCES .....	74

## Liste des figures

Figure 2.1	Principe du fonctionnement du laser.....	4
Figure 2.2	Diagramme de bandes d'une jonction p-n laser polarisée en directe.....	5
Figure 2.3	Pseudo-niveaux de Fermi dans une jonction laser polarisée en directe.....	6
Figure 2.4	(a) Émission spontanée, (b) Émission stimulée.....	8
Figure 2.5	Caractéristique de l'intensité du rayonnement émis en fonction de la densité du courant d'injection.....	10
Figure 2.6	Densités d'états de (a) matériau massif, (b) matériau à puits quantiques, (c) matériau à fils quantiques.....	14
Figure 2.7	Niveaux d'énergie dans une structure à puits quantiques.....	16
Figure 2.8	Diagramme block typique d'un système de lithographie par faisceaux d'électrons.....	22
Figure 2.9	Molécule de PMMA.....	23
Figure 2.10	La séquence des étapes dans une réaction CVD.....	25
Figure 3.1	Schéma bloc d'un laser semi-conducteur de 300 $\mu\text{m}$ de largeur par 500 $\mu\text{m}$ de longueur et 180 $\mu\text{m}$ de hauteur.....	35
Figure 3.2	Premier masque utilisé pour les lithographies par faisceaux d'électrons.....	39
Figure 3.3	Deuxième masque exposé après alignement.....	40
Figure 3.4	Masques à différentes largeurs de raies d'injection.....	41
Figure 3.5	Illustration de la séquence du procédé de la photolithographie.....	43
Figure 3.6	Étapes de clivage d'un échantillon laser.....	50
Figure 3.7	Schéma bloc type d'un système de mesure de la photoluminescence.....	52

Figure 4.1	Types de gravure humide.....	56
Figure 4.2	Profil de la couche de SiO <sub>2</sub> après une gravure au BOE.....	56
Figure 4.3	Profil de la gravure humide suite à une lithographie par faisceaux d'électrons.....	57
Figure 4.4	Profil du matériau laser après une minute de gravure au <i>KKI</i> .....	58
Figure 4.5	Profil et largeur de la crête.....	59
Figure 4.6	Profil du matériau laser après une minute de gravure à la solution <i>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/HCl</i> .....	60
Figure 4.7	Profil et largeur de la crête.....	60
Figure 4.8	Profil du matériau laser suite à une gravure humide selon l'orientation cristalline (110).....	61
Figure 4.9	Profil du matériau laser suite à une gravure humide selon l'orientation cristalline (111).....	61
Figure 4.10	Vue de face d'un laser à 27 µm de largeur de ligne d'injection.....	63
Figure 4.11	Caractéristique L-I d'une diode laser de 27µm de largeur de ligne d'injection.....	64
Figure 4.12	Vue de dessus d'un laser à 30 µm de largeur de ligne d'injection.....	64
Figure 4.13	Caractéristique L-I d'une diode laser de 30 µm de largeur de ligne d'injection.....	65
Figure 4.14	Vue de dessus d'un laser à 8.3 µm de largeur de ligne d'injection.....	66
Figure 4.15	Caractéristique L-I d'une diode laser de 8.3 µm de largeur de ligne d'injection.....	66
Figure 4.16	Montage de mesure des distributions spatiales de l'intensité lumineuse en champ lointain.....	68
Figure 4.17	Distribution spatiale de l'intensité lumineuse en champ	

	lointain d'un laser de 27 $\mu\text{m}$ de largeur de ligne d'injection.....	69
Figure 4.18	Distribution spatiale de l'intensité lumineuse en champ	
	lointain d'un laser de 30 $\mu\text{m}$ de largeur de ligne d'injection.....	69
Figure 4.19	Distribution spatiale d'un laser de 70 $\mu\text{m}$ de largeur de ligne d'injection	
	distant de 10'' du détecteur.....	70
Figure 4.20	Distribution spatiale d'un laser de 70 $\mu\text{m}$ de largeur de ligne d'injection	
	distant de 5'' du détecteur.....	71

## Liste des tableaux

Tableau 2.1	Exemples de solutions gravantes à taux bas.....	28
Tableau 2.2	Exemples de solutions gravantes à taux rapide.....	29
Tableau 3.1	Échantillon CNRC #97 138.....	34
Tableau 3.2	Couches métalliques du contact ohmique type n .....	49
Tableau 3.3	Couches métalliques du contact Schottky type p.....	49



# Chapitre 1

## INTRODUCTION

---

L'évolution de la technologie des composants photoniques a un impact direct sur le développement des systèmes optiques courants. Les systèmes de transmission point à point par fibre optique ne cessent de se développer avec un débit élevé. De nos jours, il est possible de véhiculer 32 000 communications téléphoniques à la fois (débit de 2.5 Gb/s) sur une distance de 150 Km sans avoir recours à l'implantation des répéteurs régénérateurs. On prévoit que d'ici l'an 2000, on atteindra des débits de 100 Gb/s.

L'amélioration de la qualité des circuits photoniques est l'un des défis majeurs de la microélectronique. De nouvelles techniques de fabrication des dispositifs optoélectroniques sont mises en application et de nouveaux matériaux sont sous expérimentation et ceci pour augmenter les débits d'information et minimiser les facteurs de perte dans les fibres optiques.

La microélectronique tente à tout prix d'optimiser ces problèmes, en ces dernières décennies, en utilisant des matériaux III-V tels que les hétérostructures à puits quantiques à base de phosphure d'indium (InP) et d'arseniure de gallium (GaAs) car ils offrent plusieurs propriétés optiques et électriques très intéressantes du point de vue de la diminution des pertes. En l'occurrence, le développement des techniques de fabrication des composants optoélectroniques et électro-optiques a pour but unique l'augmentation du débit de transmission dans les fibres optiques (plus de 100 Gb/s).

Parmi ces composants électroniques, les diodes lasers émettrices jouent un rôle fondamental dans la transmission de l'information binaire dans la fibre. En effet, les applications optiques exigent de plus en plus une bonne fiabilité des dispositifs optiques. De ce fait, une diode laser caractérisée d'un courant de seuil assez bas, émettant des puissances de sortie assez élevées et opérant dans des gammes de température assez larges est très demandée dans les réseaux optiques.

Il s'avère que les hétérostructures lasers à base d'InP sont très prometteuses de point de vue puissance d'opération. En effet, l'InP émet de la lumière à des longueurs d'onde comprises entre 1.3 et 1.55  $\mu\text{m}$  qui est très bénéfique pour le fonctionnement dans les fibres optiques car à des longueurs d'onde de l'ordre de 1.55  $\mu\text{m}$ , les fibres présentent un minimum d'absorption optique. Certes l'InP présente des avantages multiples dans le perfectionnement des diodes lasers, mais il y a aussi plusieurs techniques de fabrication qui contribuent de près et de loin à l'amélioration des lasers. En effet, on peut modifier la structure du matériau en adoptant divers procédés de fabrication.

Les méthodes de fabrication représentent la partie fondamentale dans le perfectionnement des dispositifs lasers. Dans ce projet on étudie divers procédés tels que la lithographie par faisceaux d'électrons et la photolithographie, les procédés de déposition des couches minces. En particulier on s'intéresse à l'étude du procédé de la gravure humide. Cette gravure consiste à modifier la structure du matériau laser pour améliorer le confinement de la lumière du laser et par conséquent diminuer son courant de seuil.

Dans le chapitre 2, on étudie la théorie des lasers semiconducteurs, plus précisément celle des lasers semiconducteurs à puits quantiques. En outre, on traite la théorie des diverses techniques de fabrication utilisées tout au long de ce projet. Dans le chapitre 3, on étudie en détail les propriétés du matériau laser adopté dans ces travaux ainsi que les paramètres de fabrication tels que le procédé de la gravure humide. Enfin, on décrit les méthodes de caractérisation. Le chapitre 4 englobe les résultats obtenus pour le procédé de la gravure humide, pour la fabrication des diodes lasers à différentes largeurs de raies d'injection et pour les mesures de la distribution spatiale de l'intensité lumineuse en champ lointain des diodes lasers fabriquées. Ces résultats sont interprétés et discutés par la suite.

## **Chapitre 2**

### **ÉTUDES THÉORIQUES DES PROCÉDÉS DE FABRICATION**

---

#### **2.1. Introduction**

Historiquement l'aventure du laser commence en 1917 quand Einstein découvre l'existence du processus d'émission stimulée, c'est à dire l'émission d'un photon commandé par un autre photon. En 1951 Weber et Twones aux Etats-Unis, et en 1954 Basov et Prokhorov en Union Soviétique, proposent d'utiliser l'émission stimulée pour amplifier les hyperfréquences. En 1954 Twones réalise le premier MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Les recherches se développent de plus en plus jusqu'au 1958 quand Aigrain émet l'hypothèse de l'utilisation des semi-conducteurs pour obtenir l'effet laser et le premier laser semi-conducteur est réalisé à base de GaAs, en 1962 (Mathieu et coll., 1996). Ensuite l'évolution des lasers semiconducteurs devient de plus en plus considérable. En ces dernières années, les lasers semi-conducteurs à puits quantiques ont un intérêt particulier pour l'industrie et la recherche. En effet, ces lasers présentent des avantages surtout dans le domaine des télécommunications.

#### **2.2. lasers semi-conducteurs**

Un laser semi-conducteur est un dispositif optoélectronique capable de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique et vice versa. Ce dispositif est fabriqué à partir de matériaux à gaps directs pour que les paires électrons-trous soient capables de se convertir en photons avec une grande efficacité. Le principe du laser est simple, la figure 2.1 montre le principe du fonctionnement du laser à quatre niveaux.

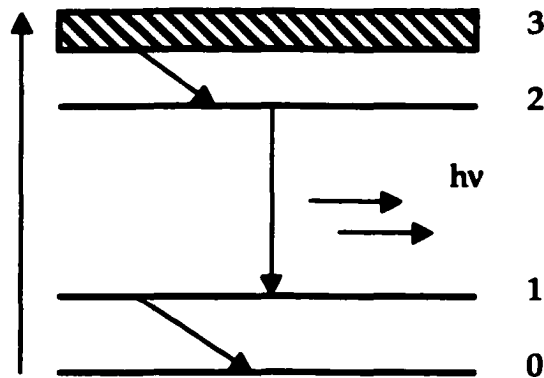


Figure 2.1 Principe du fonctionnement du laser.

Le système est donc pompé de l'état fondamental (0) dans l'état (3), par une excitation extérieure. Le niveau (3) se vide alors dans le niveau (2) et le niveau (1) se vide dans le niveau (0). Si la durée de vie dans l'état (2) est très supérieure aux durées de vie associées aux transitions (3)→(2) et (1)→(0), la population de l'état (2) augmente et celle de l'état (1) diminue. Quand l'inversion de population est réalisée, c'est à dire quand l'état (2) est plus peuplé que l'état (1),  $N_2 > N_1$  ( $N_1$  et  $N_2$  étant les densités de porteurs aux niveaux 1 et 2), tout rayonnement d'énergie  $h\nu = E_2 - E_1$  induit dans le matériau davantage de transitions du niveau d'énergie 2 vers le niveau d'énergie 1 que du niveau 1 vers le niveau 2, le milieu amplifie le rayonnement d'énergie  $h\nu$ , la condition de l'émission stimulée est réalisée.

Dans notre cas, nous nous intéressons aux lasers semi-conducteurs. En effet, le cas des semi-conducteurs est sensiblement différent. Dans ces derniers, les niveaux d'énergie sont groupés dans des bandes permises où leur répartition est quasi continue.

Cette caractéristique du semiconducteur entraîne deux conséquences au niveau du laser. La première est que la condition classique d'inversion de population entre deux niveaux discrets, ( $N_2 > N_1$ ) doit s'exprimer dans un formalisme adapté à la structure de bandes d'énergie. L'effet laser se produit donc entre les états du bas de la bande de conduction, où se thermalisent les électrons injectés dans cette bande, et les états du

sommet de la bande de valence où se thermalisent les trous créés dans cette bande. La condition d'inversion de population entre ces deux ensemble d'états s'écrit :  $E_{fc} - E_{fv} > E_g$ , c'est à dire que les pseudo- niveaux de Fermi des électrons et des trous dans le matériau excité, sont respectivement dans les bandes de conduction et de valence. La deuxième conséquence résultant de la nature pseudo-continue des états dans les bandes permises, est que le rayonnement amplifié est en partie réabsorbé par des transitions intrabandes.

Pour réaliser l'inversion de population, il faut créer beaucoup de paires électron-trou dans le matériau. Dans les lasers semi-conducteurs, si la jonction p-n est formée entre des matériaux dégénérés et polarisée en directe, les bandes auront la forme tel qu'illustré par la figure 2.2.

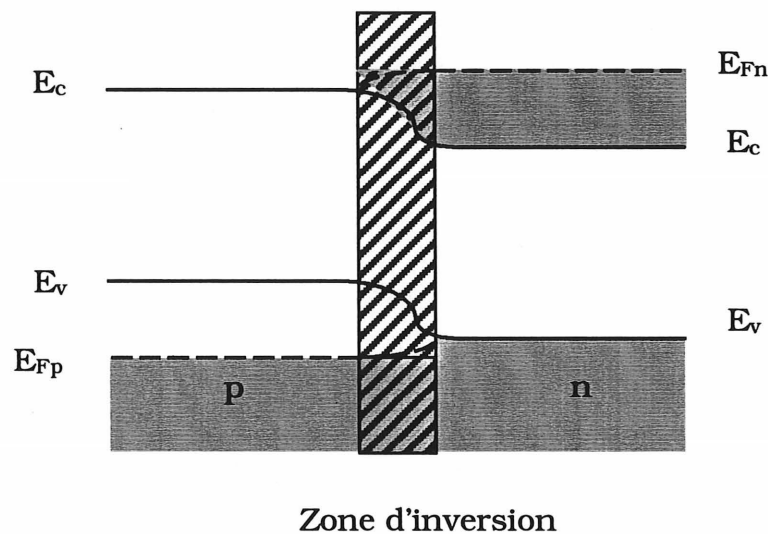


Figure 2.2. Diagramme de bandes d'une jonction p-n laser polarisée en directe.

Un laser contient trois éléments de base : le milieu de gain (semi-conducteur: GaAs, InP...), la cavité (les deux miroirs) et la pompe (optique ou électrique). Un laser semi-conducteur se compose d'une partie centrale active. La région active se trouve dans le plan de la jonction d'une diode p-n. Si le courant d'injection dans la jonction est assez élevé, les électrons et les trous sont injectés dans et à travers la région de transition avec des concentrations importantes. En effet, on aura une grande concentration

d'électrons au niveau de la bande de conduction et une grande concentration de trous au niveau de la bande de valence. Si cette population est assez élevée, la condition d'inversion de population est alors réalisée et par conséquent la zone de la jonction où ce phénomène se produit est appelée *région d'inversion*. La figure 2.2 illustre un état non équilibré de la condition de polarisation directe de la jonction laser. La figure 2.3 présente le diagramme de bandes illustrant les distributions des électrons et des trous  $F_n$  et  $F_p$  pour atteindre les pseudo-niveaux de Fermi  $E_{Fn}$  et  $E_{Fp}$  à l'équilibre.

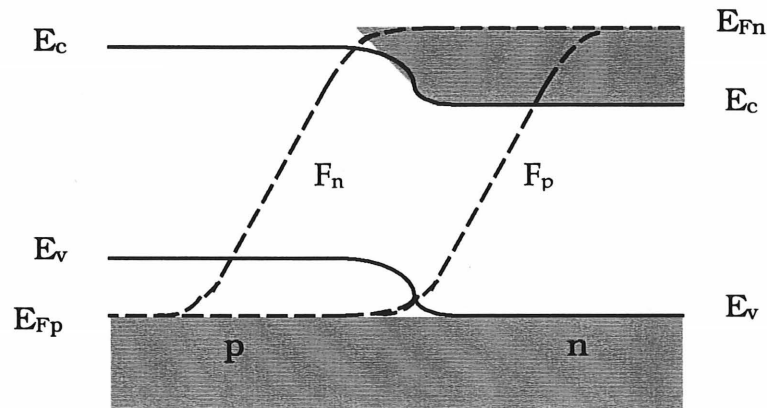


Figure 2.3. Pseudo-niveaux de Fermi dans une jonction laser polarisée en directe.

Lors de l'inversion de population dans les semi-conducteurs, on doit tenir compte de la distribution des énergies lors des transitions inter-bandes. L'inversion de population est définie comme étant la dominance de l'émission stimulée entre deux niveaux d'énergie séparés par une énergie  $h\nu$  et la population des électrons du niveau haut doit être supérieure à celle du niveau bas. L'inversion de population se produit lors des transitions entre le niveau inférieur de la bande de conduction  $E_c$  et le niveau supérieur de la bande de valence  $E_v$ . En effet, les transitions entre les niveaux de la bande de conduction jusqu'au niveau de  $F_n$  et ceux de la bande de valence jusqu'au niveau de  $F_p$  se produisent sous des conditions spécifiques. En fait, il faut que :

$\Delta F = (F_n - F_p) > h\nu$ . L'énergie minimale tolérable pour engendrer l'inversion de population dans le cas des transitions inter-bandes est :  $h\nu = E_c - E_v = E_g$ .

Les régions n et p sont très dopées, les extrema des bandes de valence et de conduction sont perturbés par l'étalement des états donneurs et accepteurs et par l'effet d'écran associé à la grande densité de porteurs libres. Il en résulte une normalisation du gap du matériau qui est alors caractérisé par un gap effectif  $E'_g < E_g$ . La longueur d'onde du rayonnement émis par le laser est conditionnée par la valeur du gap effectif  $E'_g$ .

Un laser semi-conducteur se caractérise par une grande facilité de modulation, ce qui le rend particulièrement bien adapté aux télécommunications par fibres optiques. En ce qui concerne la longueur d'onde du rayonnement émis, tout le spectre visible et proche infrarouge peut être couvert par la réalisation d'alliage de composés III-V et II-VI.

L'hétérostructure du laser doit permettre le confinement de la lumière selon la direction d'injection du courant. Ceci implique que les couches au-dessous et au-dessus de la région active doivent avoir des indices de réfraction plus petits que celui de la région active. Pour avoir une structure laser performante, plusieurs techniques de croissance pour les semi-conducteurs sont utilisées pour réaliser ces structures d'une façon efficace. Des dimensions typiques de ces dispositifs sont 300 $\mu$ m de largeur par 500 $\mu$ m de longueur. Le choix des matériaux est principalement déterminé par la contrainte que la probabilité de recombinaison radiative doit être suffisamment élevée. Cette contrainte est satisfaite par les semi-conducteurs à gap direct. La figure 2.4 décrit le comportement d'un laser semi-conducteur.

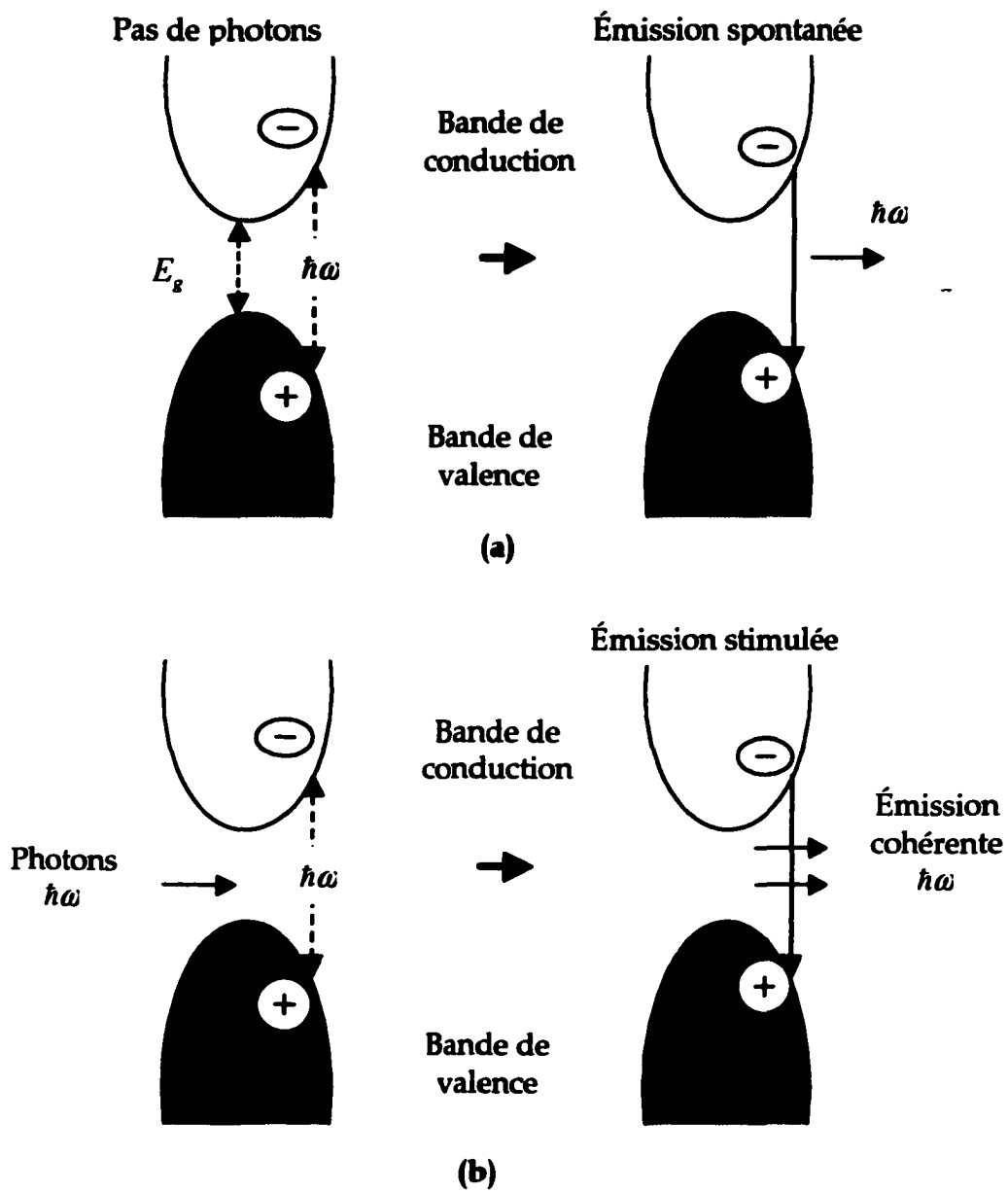


Figure 2.4. (a) Émission spontanée, (b) Émission stimulée.



### 2.2.1. Gain d'un laser semi-conducteur

Le gain, ou coefficient d'amplification, du matériau est défini, comme le coefficient d'absorption, par la variation relative de la densité de rayonnement par unité de longueur, soit :

$$g(E) = \frac{1}{\phi(E)} \frac{d\phi(E)}{dx} \quad (2-1)$$

La variation du flux de photons au cours d'un trajet de longueur  $x$  dans le matériau est obtenue en intégrant l'expression 2-1, soit :

$$\phi(E) = \phi_0(E) e^{g(E)x} \quad (2-2)$$

$g(E)$  représente indifféremment le coefficient d'amplification et le coefficient d'absorption du matériau. Si  $g(E)$  est positif,  $d\phi(E)/dx$  est positif, le flux de photons d'énergie  $E$  augmente en se propageant dans le matériau. Si  $g(E)$  est négatif,  $d\phi(E)/dx$  est négatif, le flux de photons d'énergie  $E$  diminue en se propageant dans le matériau. Dans ce cas on pose  $\alpha(E) = -g(E)$ , où  $\alpha(E)$  positif représente le coefficient d'absorption.

Le gain  $g(E)$  est directement lié au taux d'émission stimulée  $r_{st}(E)$  qui représente le nombre de photons créés par émission stimulée, par unité de volume et unité de temps, de sorte que si  $\phi(E)$  représente le flux de photons dans le matériau,  $r_{st}(E)$  est donné par l'équation 2-3 (Barrau et col., 1992; Mendez et col., 1987; Peter et col., 1993):

$$r_{st}(E) = \frac{d\phi(E)}{dx} \quad (2-3)$$

$$g(E) = \frac{r_{st}(E)}{\phi(E)} \quad (2-4)$$

Le gain est directement proportionnel au taux d'émission stimulée, de sorte que  $g(E)$  est positif si la condition d'inversion de population  $\Delta F > E$  est réalisée. Mais cette condition nécessaire n'est pas suffisante pour obtenir une réelle amplification du rayonnement. Il faut que  $g(E)$  soit non seulement positif mais de plus, supérieur aux

pertes. Il faut noter que l'intensité globale du rayonnement émis par la diode est fonction du courant d'excitation donc il est fondamental d'étudier le comportement de la diode laser en présence d'un courant d'injection.

### 2.2.2. Courant de seuil d'un laser semi-conducteur

Le rayonnement dans un laser semi-conducteur dépend directement du courant d'excitation. L'allure de la courbe de variation est représentée sur la figure 2.5.

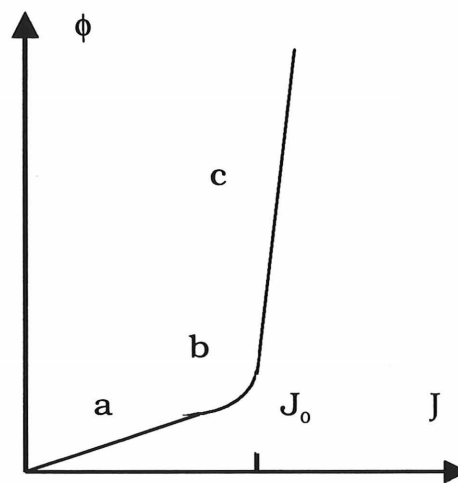


Figure 2.5 Caractéristique de l'intensité du rayonnement émis en fonction de la densité du courant d'injection.

À faible niveau d'injection, l'inversion de population n'est pas réalisée puisque  $g(E) < \alpha_p$  pour toutes les énergies;  $\alpha_p$  étant le coefficient d'absorption par porteur libres. Seule l'émission spontanée apparaît. Le rendement radiatif de la diode est alors sensiblement constant, l'intensité du rayonnement émis est proportionnelle à la densité de porteurs injectés et par conséquent au courant traversant la diode.

Le spectre du rayonnement émis est modulé par le spectre du gain  $g(E)$ . Lorsque la condition d'oscillation est remplie dans un intervalle d'énergie à l'intérieur de la raie d'émission stimulée, la cavité sélectionne un certain nombre de modes définis par :

$2nL=k\lambda$ , où  $L$  est la longueur de la cavité,  $n$  l'indice du milieu et  $k$  l'ordre d'interférence. L'intervalle entre deux modes est donné par la différentielle de l'expression 2-5:

$$dk = \frac{Ld\lambda}{\lambda^2} 2n \left( \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} - 1 \right) \quad (2-5)$$

La distance inter mode est donnée par l'expression suivante :

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L} \left( n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right)^{-1} \quad (2-6)$$

L'enveloppe du spectre d'émission de la diode laser est la raie d'émission stimulée. Dans certaines conditions et pour une excitation légèrement supérieure au seuil, la largeur de raie peut autoriser qu'un seul mode, l'émission de la diode est alors *monomode*. De manière générale cette émission est *multimode*.

Si la diode est polarisée par un courant constant inférieur au courant de seuil,  $J < J_0$ , elle n'émet qu'un rayonnement spontané, la densité de photons par mode est négligeable. La durée de vie des porteurs excédentaires est constante, c'est la durée de vie spontanée, la densité de ces porteurs augmente linéairement avec le courant, ainsi que le taux d'émission spontanée.

Lorsque la diode est polarisée par un courant égal au courant de seuil,  $J = J_0$ , le gain dans la région active compense les pertes globales de la cavité et le nombre de photons contribuant au mode d'oscillation devient différent de zéro. Le courant de seuil de la diode est inversement proportionnel aux durées de vie des électrons et des photons dans la cavité.

Lorsque la diode est polarisée par un courant supérieur au courant de seuil,  $J > J_0$ , la diode oscille sur le mode sélectionné par la cavité, la densité des photons sur ce mode devient importante et la durée de vie des électrons excédentaires diminue en raison du phénomène d'émission stimulée. La densité d'électrons excédentaires n'augmente plus et reste égale à sa valeur de seuil. La densité des photons sur le mode d'oscillation et

donc l'intensité du rayonnement émis sur ce mode augmentent proportionnellement à l'excès de courant par rapport au courant de seuil.

Il faut toutefois noter que dans la pratique, plusieurs phénomènes perturbent ce type de fonctionnement idéal. Le régime monomode n'est généralement obtenu que pour des courants de polarisation voisins du courant de seuil  $J_0$ , au-delà la diode laser fonctionne en régime multimode.

De nos jours, les lasers semi-conducteurs à puits quantiques sont les plus utilisés et les plus efficaces pour plusieurs applications optiques et ils sont très performants dans les applications de télécommunication. La partie suivante décrit les particularités de ces diodes.

### **2.3. lasers semi-conducteurs à puits quantiques**

Les structures lasers à puits quantique simple et à puits quantiques multiples sont des composants efficaces pour l'optique intégrée et les communications optiques. En effet, les lasers à puits quantiques présentent des performances significatives telles qu'une densité de courant assez basse, une efficacité différentielle quantique assez élevée, des améliorations de la cohérence en réduisant les largeurs de lignes d'injection. Par conséquent on aura une meilleure stabilité de modes, une bande de modulation plus large et donc une minimisation des facteurs de bruit durant la modulation.

Le courant de seuil des lasers à puits quantiques multiples peut être minimisé en choisissant un nombre optimum de puits quantiques pour une longueur de cavité donnée (Peter et coll., 1993; Kasukawa et coll., 1992). Une augmentation du nombre de puits peut être bénéfique puisqu'elle va réduire le niveau d'injection et par conséquent maximiser le gain ainsi que diminuer les contributions indésirables du courant. Le fait de minimiser les niveaux d'injection est important pour les lasers à puits quantiques multiples ayant des longueurs d'onde assez élevées tels que les lasers fabriqués à partir d'InGaAsP/InP.

Un puits quantique constitue un système à deux dimensions pour le mouvement des porteurs de charge. Dans le plan horizontal  $(x,y)$  du puits, le mouvement reste illimité; alors que suivant la dimension verticale  $z$ , il est confiné. La densité d'états dans ce type de système est obtenue à partir des niveaux d'énergie  $E_n$  ( $n=1,2,3,\dots$ ) de la dimension quantifiée  $z$  (Kuhn et coll., 1997).

Afin de réduire le courant de seuil et d'augmenter le confinement des porteurs on rétrécit le volume de la zone d'inversion. La réduction de volume de la zone d'inversion est obtenue par la réalisation de lasers à puits quantiques. Le puits quantique présente le double intérêt d'une part de réduire l'extension spatiale des électrons et des trous, et d'autre part de confiner leurs distributions énergétiques par la nature bidimensionnelle de la densité d'état (Peter et coll., 1993).

Le paramètre qui joue un rôle essentiel dans ces structures à puits quantiques est le facteur de confinement  $\Gamma$  qui mesure le taux de recouvrement des distributions spatiales des porteurs et des photons, c'est à dire le taux de recouvrement de la zone active et du rayonnement.

Un avantage très évident des lasers semi-conducteurs à puits quantiques est la possibilité de varier la longueur d'onde tout en modifiant la largeur du puits quantique. Un laser à puits quantiques a plus de gain par porteur injecté qu'un laser semi-conducteur conventionnel et ceci résulte en des courants de seuil plus bas. Un autre avantage fondamental est que les lasers à puits quantiques délivrent leur gain avec le minimum d'altération dans l'indice de réfraction que les lasers semi-conducteurs conventionnels et ceci diminue les facteurs de bruit. Le gain différentiel ou le gain par électron injecté est considérable dans ce type de lasers et résulte en des vitesses de modulation élevées.

Le confinement planaire dans les puits quantiques a comme conséquence directe de réduire le courant de seuil dans les lasers, engendré par la modification de la densité d'état au niveau du plan de confinement. En effet, dans un substrat semi-conducteur

conventionnel, la densité d'état augmente en fonction de la racine carrée de l'énergie tandis que dans un puits quantique la densité d'état est constante dans les couches quantiques et fonction de l'inverse de la racine carré de l'énergie pour les fils quantiques.

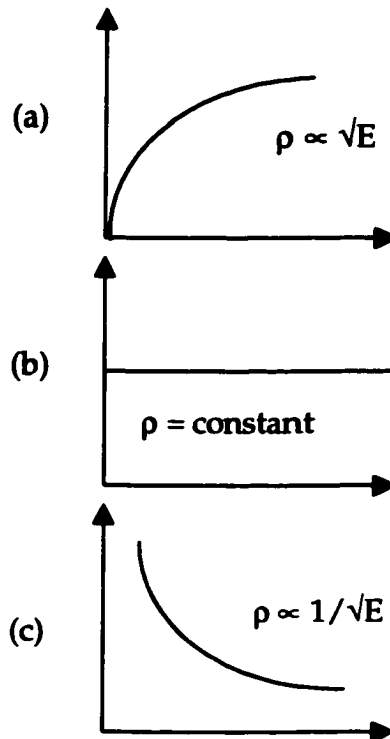


Figure 2.6. Densités d'états de (a) matériau massif, (b) matériau à puits quantiques, (c) matériau à fils quantiques.

La conservation du moment optique dans les transitions optiques a pour conséquence que les densités d'état déterminent les spectres d'absorption et d'émission optiques. Un gain élevé exige une inversion de population avec une densité d'état assez élevée. Pour avoir une structure laser à puits quantiques, il faut bien choisir les méthodes de croissance adéquates capables de former des couches assez minces telles que CBE, MBE, MOCVD, LPE....

La figure 2.7 illustre les niveaux d'énergie dans une structure à puits quantiques, on retrouve les niveaux d'énergie pour les électrons, les trous lourds et les trous légers. Le potentiel de confinement dans la bande de conduction quantifiée est supérieur au potentiel de confinement pour la bande de valence quantifiée. La largeur physique du puits est donnée par  $L_z$ . Dans le cas d'un potentiel dans des barrières infinies, on obtient pour les niveaux d'énergie le résultat suivant :

$$E_n = \frac{h^2 n^2}{2L_z^2 m_n^*} \quad (2-7)$$

- $L_z$  est la largeur du puits quantique.
- $n$  est le nombre du niveaux.
- $m_n^*$  est la masse effective de l'électron.
- $h$  est la constante de Planck.

La séparation entre le niveau inférieur dans la bande de conduction et le niveau supérieur dans la bande de valence est donnée par l'équation 2-8 :

$$E_q = E_g + E_{lc} + E_{lhh} \approx E_g + \frac{h^2}{8L_z^2} \left( \frac{1}{m_c} + \frac{1}{m_{hh}} \right) \quad (2-8)$$

De cette équation, on peut déduire qu'on peut modifier l'énergie des photons en agissant sur la largeur du puits quantique.

Bande de conduction

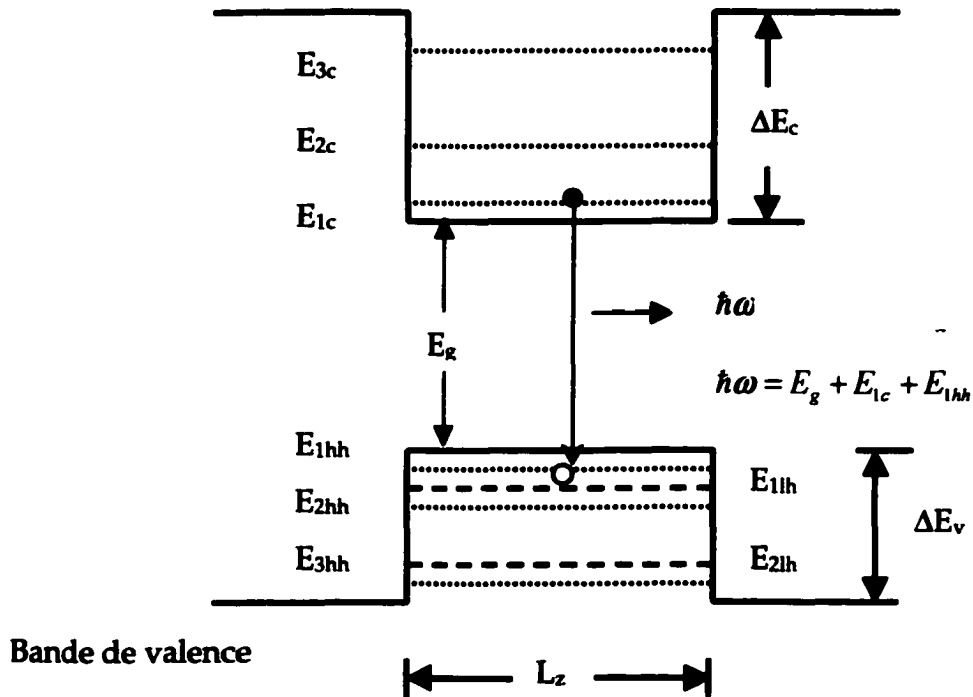


Figure 2.7 Niveaux d'énergie dans une structure à puits quantiques.

### 2.3.1. Gain optique

Les lasers à puits quantiques ont des courants de seuil plus bas que ceux des diodes lasers conventionnelles fabriquées à partir de matériaux massifs. L'origine des améliorations des performances des lasers n'est pas au niveau du confinement quantique des électrons et des trous mais se résume au niveau de la réduction des dimensions physiques de la région active. Par exemple, une réduction de l'épaisseur de la région active de  $0.1 \mu\text{m}$  à  $10 \text{ nm}$ , engendre une réduction du volume actif par un facteur de 10 et une amélioration du seuil de l'effet laser approximativement par le même facteur (Kuhn et col., 1997). Une possibilité d'amélioration est de réduire les dimensions latérales du puits quantique (en un fil ou un point). L'étude du courant de



seuil des lasers semi-conducteurs revient à étudier les caractéristiques du gain optique du milieu laser. En effet les densités des électrons et des trous sont les suivantes :

$$N = \int \rho_c(E_c) f_c(E_c, E_{fc}) dE_c \quad (2-9)$$

$$P = \int \rho_v(E_v) f_v(E_v, E_{fv}) dE_v \quad (2-10)$$

$$f_c(E_c, E_{fc}) = \frac{1}{\exp(E_c - E_{fc}) + 1} \quad (2-11)$$

$$f_v(E_v, E_{fv}) = \frac{1}{\exp(E_v - E_{fv}) + 1} \quad (2-12)$$

Les fonctions  $f_c$  et  $f_v$  sont les distributions de Fermi dans la bande de conduction et dans la bande de valence,  $E_c$  et  $E_v$  sont respectivement les niveaux de Fermi dans les bandes de conduction et de valence. Les quantités  $\rho_c$  et  $\rho_v$  sont les densités d'état qui sont généralement proportionnelles à la racine carrée de l'énergie. Dans un puits idéal, elles ont la forme d'un profil abrupt à plusieurs niveaux (forme d'escalier). Cependant, à cause des interactions entre les différentes bandes de valence et la non-parabolicité des bandes, la densité d'état assume des formes plus compliquées que le modèle simple des escaliers. Le coefficient d'absorption optique est le suivant :

$$\alpha(E) = \xi \rho_r (1 - f_c - f_v) \quad (2-13)$$

$$E = \hbar\omega - E_g = E_c + E_v \quad (2-14)$$

Où  $E$  est l'énergie réduite du photon,  $\xi$  est la constante du matériau,  $E_g$  est l'énergie du gap du matériau à puits quantiques et  $\rho_r(E)$  est la densité d'état réduite qui dans le cas d'un puits quantique à deux dimensions est donnée par :

$$\frac{1}{\rho_r} = \sum_i \left( \frac{1}{\rho_c} + \frac{1}{\rho_v} \right) \quad (2-15)$$

Si les bandes d'énergie, dans les directions x et y, sont approximativement paraboliques, la densité d'état (par unité de surface) pour une sous-bande donnée (n<sup>ème</sup> niveau) est :

$$\rho = \frac{m_n^*}{\pi \hbar^2 L_z} \quad (2-16)$$

Où  $m_n^*$  est la masse effective de la sous-bande. Puisque la densité d'état est indépendante de l'énergie, on aura dans une structure à puits quantique seulement un groupe d'électrons ayant tous approximativement la même énergie peuvent se recombiner avec un groupe de trous ayant également tous la même énergie. Les recombinaisons électron-trou dans un puits quantique suivent la règle de sélection  $\Delta n=0$ . Cependant, à cause des différences entre la bande de valence pour les trous lourds et celles des trous légers, une recombinaison avec un trou léger s'effectue à une énergie supérieure à une recombinaison avec un trou lourd.

### 2.3.2. Courant de seuil

Le gain de seuil  $g_{th}$  est obtenu à partir des pertes optiques dans les modes suivant l'équation 2-17 :

$$G_{th} = \Gamma g_{th} = [\alpha_i + \ln(1/R)/L] \quad (2-17)$$

- G : gain du mode,
- $\Gamma$  : facteur de confinement,
- g : coefficient du gain local,
- $\alpha_i$  : coefficient de pertes intrinsèques,
- R : coefficient de réflexion des deux miroirs,
- $\alpha_m = \ln(1/R)/L$  : facteur de pertes dans les miroirs,

Les pertes  $\alpha_m$  dans les miroirs et le facteur de confinement  $\Gamma$  sont les paramètres les plus importants dans la détermination du gain de seuil  $g_{th}$  dans les lasers à puits quantiques. En effet, lorsque  $\alpha_m$  augmente ou  $\Gamma$  diminue,  $g_{th}$  augmente et par conséquent, on atteint le régime de saturation. Le facteur de pertes dans les miroirs  $\alpha_m$  est contrôlé par la longueur de la cavité laser  $L$  et par le coefficient de réflexion  $R$ , tandis que le facteur de confinement  $\Gamma$  dépend du nombre de puits quantiques. Pour opérer dans des conditions favorables d'injection, il faut augmenter soit la longueur de la cavité laser  $L$ , soit le nombre de puits. Cependant, l'augmentation de la longueur de la cavité  $L$  représentera un obstacle pour l'obtention d'une densité de courant de seuil  $J_{th}$  minimale. Ceci nous mène à conclure que le choix de lasers à puits quantiques multiples avec des cavités relativement longues, fabriqués à partir de matériaux ayant des gaps assez faibles tels que les systèmes InGaAsP/InP, est le meilleur.

Le courant de seuil  $I_{th}$  est défini comme étant le produit de la densité de courant  $J_{th}$  par la surface de la région active. Le courant de seuil minimal  $I_{th}^{min}$  est donné par l'expression suivante :

$$I_{th}^{min} = I_0 G_{th} L = I_0 [\ln(1/R) + \alpha_m L] \quad (2-18)$$

Où  $I_0$  est une fonction des dimensions des puits quantiques. Par exemple, le courant de seuil d'un laser à 6 puits quantiques est réduit en diminuant la longueur de la cavité à 80 $\mu$ m (Issanchou et coll., 1997). Théoriquement, un courant de seuil bas est atteint en augmentant le nombre de puits quantiques. De plus la réduction du courant est accessible en utilisant des facettes à réflectivité élevée et ceci pour diminuer les pertes optiques modales.

Certes la structure du matériau laser utilisée est importante mais les techniques de fabrication des laser semi-conducteurs présentent aussi une grande importance dans la détermination des performances du dispositifs. La lithographie par faisceaux d'électrons est l'une des premières étapes sensibles de fabrication pour l'accomplissement de ces travaux.

## **2.4. Lithographie par faisceaux d'électrons**

La lithographie par faisceaux d'électrons (LFE) est une technique spécialisée pour reproduire des motifs extrêmement fins et petits. La technique consiste à balayer un faisceau d'électrons à travers une surface couverte par un film de résine sensible aux électrons. Le processus de formation du faisceau d'électrons et son système de balayage est similaire à celui de la télévision.

Les principales caractéristiques de cette technique se résument en la très haute résolution, la flexibilité de la méthode qui peut utiliser une variété de matériaux et un nombre presque infini de motifs (Ils et col., 1994; Kjellberg et col., 1992). En revanche, la lithographie par faisceaux d'électrons est nettement plus lente que la lithographie optique.

La PMMA (poly méthyle méthacrylate) est la résine la plus répandue pour le faisceau d'électrons. La lithographie par faisceaux d'électrons se caractérise par trois applications essentielles . La première application consiste à fabriquer des masques. En effet, c'est une technique très répandue pour concevoir les masques. Le contrôle des dimensions de largeurs de lignes et les spécifications de positionnement des motifs sur l'échantillon s'effectuent avec une précision de l'ordre de 50 nm.

La deuxième application c'est la possibilité d'exposer directement le motif désiré à partir du fichier CAD. En effet, la flexibilité et la haute résolution jouent un rôle primordial pour fabriquer des dispositifs de hautes performances. Finalement, la lithographie par faisceaux d'électrons est utilisée souvent pour étudier les limites de fonctionnement des circuits intégrés et pour interpréter les effets quantiques et autres nouveaux phénomènes physiques qui apparaissent à des dimensions très petites.

#### **2.4.1. Description du microscope électronique à balayage et du logiciel utilisé**

Le microscope électronique à balayage utilisé pour ce projet dans les salles blanches de l'Université de Sherbrooke est un JEOL-JSM6300. Il a servi pour faire des lithographies par faisceaux d'électrons afin de pouvoir fabriquer des diodes lasers. Ce microscope électronique à balayage (MEB) possède un grossissement maximal de 300 000X et une résolution de l'ordre de 5nm dans des conditions optimales. L'énergie maximale des électrons est de 30 KeV. C'est à cette énergie que sont réalisées la plupart des nanostructures. Il est cependant possible de travailler à faible énergie bien qu'il y ait une légère perte de résolution. Les plus faibles énergies sont souvent utilisées pour l'imagerie des nanostructures.

Le MEB est relié à un ordinateur personnel qui contrôle la position du faisceau d'électrons. L'ordinateur contrôle aussi un obturateur de faisceau situé au-dessus de l'échantillon. Ce dernier permet d'effectuer une exposition point par point de l'échantillon sans exposer la résine en des endroits non désirés. Le schéma bloc de la figure 2.8 qui suit présente les différentes parties constituant un système de LFE.

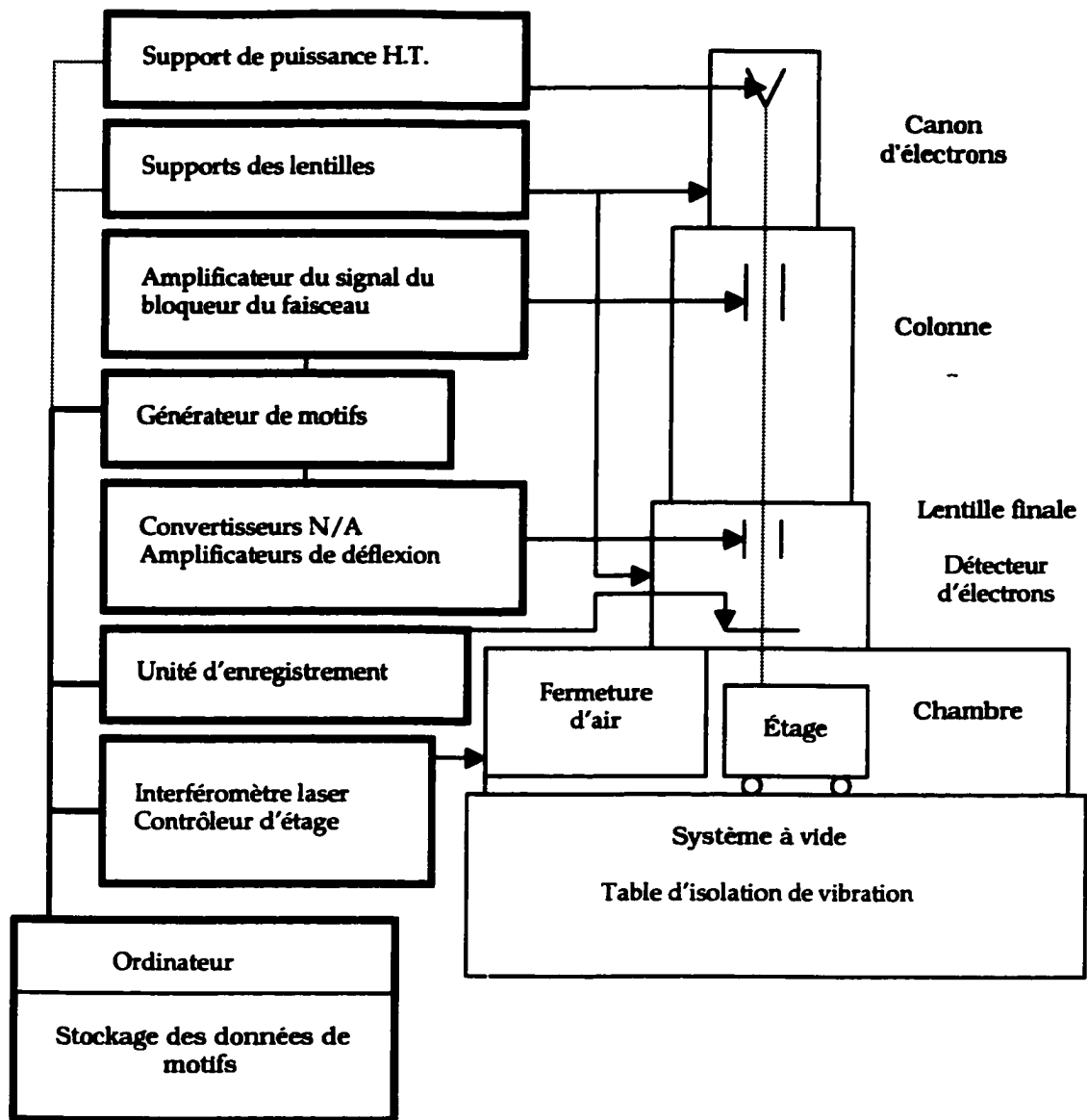


Figure 2.8 Diagramme bloc typique d'un système de lithographie par faisceaux d'électrons.

Le MEB de l'Université de Sherbrooke ne contient pas l'unité d'enregistrement et l'interféromètre laser. Le contrôle du faisceau et de l'intercepteur est fait par un logiciel commercial : Nanometer Pattern Generation System (NPGS) de J.C. Nabity Lithography Systems. Ce dernier interprète les motifs dessinés à l'aide d'un logiciel de CAO commercial, DesignCad2D. En outre, le motif dessiné est transformé en une matrice de points par NPGS. NPGS permet de contrôler la distance entre chaque point exposé ainsi que la distance entre les rangées de points (line spacing). On peut aussi choisir la dose d'électrons (coulomb/unité de surface) et le grossissement utilisé. Le grossissement maximal permis par NPGS est de 10 000X et la valeur choisie pour ce grossissement influence la résolution de la lithographie ainsi que les dimensions du champ d'écriture. NPGS contrôle le MEB de telle sorte que les points de la matrice sont exposés successivement, en bloquant le faisceau avec l'obturateur entre chaque point.

#### 2.4.2. Description de la résine

Le faisceau est utilisé pour briser les liaisons chimiques du polymère. Dans notre cas le polymère utilisé est du poly [méthyl méthacrylate] (PMMA). Nous utilisons deux types de mélange de résine. Le premier type, plus sensible aux électrons, a une masse moléculaire moyenne d'environ 120 000. Le second, moins sensible est formé de molécules de PMMA dont la masse moléculaire moyenne est d'environ 900 000. La figure 2.9 illustre une molécule de PMMA.

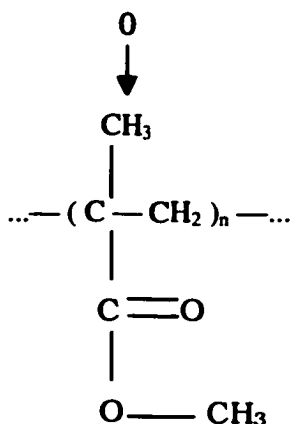


Figure 2.9 Molécule de PMMA.

Ces polymères sont ensuite dissous dans un solvant pour permettre l'épilage uniforme de la résine sur l'échantillon à l'aide d'une tournette. L'échantillon est ensuite étuvé pendant quelques heures à 180°C. La concentration de polymère dans la résine détermine l'épaisseur du film étalé à la surface de l'échantillon. Ces couches plus épaisses, comme celles des résines de 15%, sont nécessaires pour l'évaporation et le soulèvement de couches de métal plus importantes.

Une fois l'exposition effectuée, on utilise un solvant ou une combinaison de solvants comme développeur. Ces solvants sont sélectifs en terme de masse moléculaire et ne dissolvent que des chaînes de polymères qui ont été brisées par le faisceau d'électrons et dont la masse moléculaire est inférieure au seuil de dissolution. Deux mélanges sont largement utilisés ici comme développeur : alcool isopropylique : eau (IPA :H<sub>2</sub>O) et alcool isopropylique : méthyl isobutyl cétone (IPA :MIBK).

La technique de lithographie représente une étape primordiale dans l'amélioration de la fabrication des dispositifs lasers. Cependant, la structure du matériau lui même est un paramètre important dans la fabrication. En effet, pour déterminer la structure du matériau, on doit faire croître des couches épitaxiées sur des substrats monocristallins.

## **2.5. Techniques de croissances épitaxiales**

Le but principal des différentes techniques de croissance épitaxiale est de déposer des couches minces sur des substrats semi-conducteurs pour modifier les propriétés du matériau concerné. De plus, en déposant des couches épitaxiées, on peut contrôler le dopage et l'épaisseur de la couche. On peut aussi améliorer la pureté du matériau qui va influencer la mobilité. Les croissances hétéroépitaxiales servent énormément dans la structuration des couches de type n et p dans un matériau laser et dans la définition du taux de dopage au niveau de chaque couche. L'hétéroépitaxie consiste à faire croître des films de différentes compositions chimiques.



Les méthodes de croissance épitaxiale se classent en deux types : les épitaxies physiques et les épitaxies chimiques. L'épitaxie par jet moléculaire (Molecular Beam Epitaxy) MBE, et l'épitaxie en phase liquide (Liquid-Phase Epitaxy) LPE sont parmi les épitaxies physiques. En effet, la MBE utilise l'évaporation des matériaux des couches minces comme moyen de déposition. Grâce à la basse température et au système à vide, on contrôle d'une façon précise le dopage dans les films les plus minces. Quant à la LPE, cette méthode utilise des matériaux liquéfiés dans lesquels on fait immerger les substrats. Le contrôle de la température et des concentrations des solutions dans cette méthode est fondamentale pour pouvoir aboutir à l'uniformité des films. Elle est utilisée surtout pour la croissance du GaAs.

Ensuite, on trouve les méthodes de croissance par réactions chimiques telles que la dépôt chimique par vapeur (Chemical Vapor Deposition) CVD et le dépôt chimique par métal-organique en phase vapeur (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) MOCVD. Dans ces deux épitaxies, un ou plusieurs gaz réagissent à la surface pour former le film. Le film désiré doit avoir une épaisseur et une composition uniformes ainsi qu'une structure et pureté adéquates. Ceci exige des conditions spécifiques pour accomplir les réactions chimiques. La figure 2.10 présente les étapes nécessaires dans un procédé CVD.

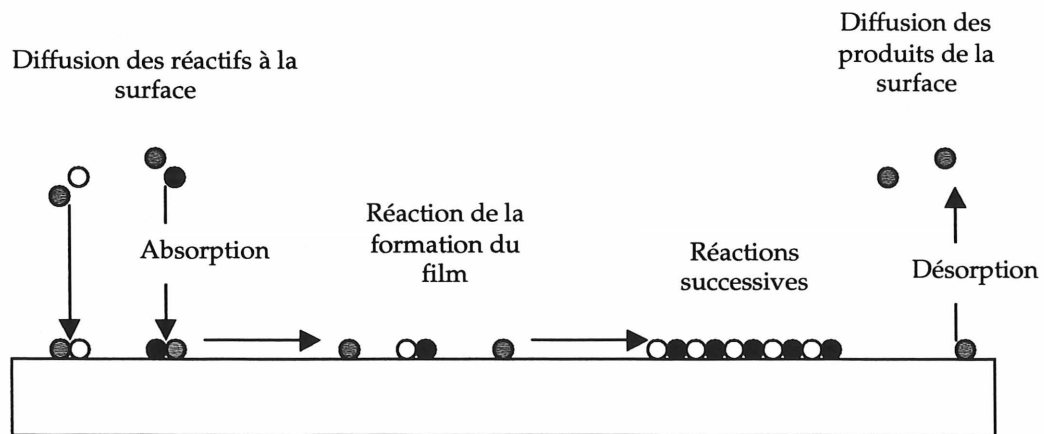


Figure 2.10. La séquence des étapes dans une réaction CVD.

À l'Université de Sherbrooke et plus précisément dans le groupe de micro-électronique, les matériaux à structures lasers utilisés lors de ce projet sont épitaxiés au CNRC par la technique CBE (Chemical Beam Epitaxy).

La technique CBE est utilisée surtout dans les croissances de matériaux qui ont des couches extrêmement fines et des interfaces abruptes tels que l'InP (Uchida et coll., 1992). Les principaux avantages de la CBE par rapport aux techniques MBE et MOCVD conventionnelles se résument en : la possibilité de faire croître des couches de haute qualité sur l'InP, l'élimination des défauts ovales à des taux de croissance assez élevés, l'obtention d'une très bonne qualité d'épitaxie sur l'InP à des taux de croissance élevés, la diversité d'utilisation de sources d'alkyl et d'hydride, une bonne homogénéité et uniformité de composition sur une surface de substrat assez large et la possibilité de faire des épitaxies sélectives.

L'étape qui suit est l'application des différentes gravures (humides et sèches) sur les couches du matériau laser pour déterminer la structure du dispositif à fabriquer.

## **2.6. Procédés de gravure humide sur les matériaux lasers**

La gravure humide est une attaque chimique du matériau. Dans ces travaux, on a eu recours à des masques pour définir les régions de gravure. Un moyen évident pour accomplir ceci est d'immerger l'échantillon dans un bain de substances chimiques capables d'attaquer les couches minces à graver. Ces substances ou ces gravants doivent avoir des caractéristiques spécifiques. Ils doivent réagir avec les couches minces d'une façon reproductible en engendrant des produits solubles capables de s'arracher facilement de la surface du substrat. Ils ne doivent pas réagir avec le masque, en effet, la gravure doit être sélective affectant juste les films considérés. Une solution de gravure idéale ne doit pas attaquer les couches en dessous du film et par conséquent le processus de gravure doit être auto-limité.

### 2.6.1. Paramètres caractéristiques des gravures humides

Lors de ce projet, deux types de gravure sont concernés : la gravure humide de l'oxyde et celle des couches épitaxiées à structures quantiques. En effet, la gravure humide présente toujours une importance considérable dans la fabrication des semi-conducteurs malgré les progrès considérables atteints avec les gravures sèches ou à plasma et surtout du point de vue coût (Boche et coll., 1996 ; Coldren et coll., 1982). Cependant, la gravure à plasma présente un avantage majeur au niveau de la vitesse de gravure verticale qui est plus élevée que celle latérale.

Les principaux paramètres caractérisant une gravure humide sont : le taux ou la vitesse de gravure  $r$  (profondeur/unité de temps) de la solution gravante, le temps nécessaire pour graver une certaine profondeur  $R$  pendant un temps  $t_1$  tel que :  $R = r t_1$ .

En outre, si on considère la gravure humide de l'oxyde de silicium amorphe  $\text{SiO}_2$ , cette dernière peut se faire dans des solutions acides de HF pur ou de KOH (Monk et coll., 1993) ou de BOE (Buffered Oxide Etch). Le  $\text{SiO}_2$  concerné est une couche mince déposée par PECVD dont l'épaisseur est déterminée par l'utilisateur et sous des conditions appropriées. Le taux de gravure diffère d'un dépôt à un autre car il dépend directement de la température du dépôt, de la densité et des contraintes du film du dioxyde de silicium.

Le BOE dissout le  $\text{SiO}_2$  deux fois plus rapidement qu'une solution simple de HF pur de même molarité. La composition la plus utilisée de BOE est un mélange 7:1 qui contient 7 volumes de 40.% en poids de  $\text{NH}_4\text{F}$  dilué dans l'eau et un volume de 49% de HF (Higuchi et coll., 1996). Ceci résulte en un taux de gravure de 100 nm/min à la température ambiante 25°C pour les couches minces de  $\text{SiO}_2$  déposées par PECVD.

La deuxième gravure se fait au niveau des hétérostructures épitaxiées sur un substrat d'InP. La gravure sur l'InP se fait en deux étapes, une gravure rapide et une seconde lente (Ishikawa et coll., 1989). Un taux élevé est nécessaire pour obtenir une

gravure profonde et efficace tandis qu'un taux faible favorise un contrôle précis sur la gravure. Plusieurs solutions gravantes sont utilisées telles que les solutions à gravure lente ainsi le système phosphorique ( $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2$ ) et le système aqua regia ( $\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2$ ). Parmi les solutions gravantes à taux rapide on trouve la solution KKI ( $\text{HCl}:\text{CH}_3\text{COOH}:\text{H}_2\text{O}_2$ ) (Ishikawa et coll., 1989). Les tableaux ci-dessous représentent quelques exemples de solutions gravantes à taux bas et à taux élevé (Toshio et coll., 1980).

Tableau 2.1 Exemples de solutions gravantes à taux bas.

Combinaison de réactifs gravants	Rapport de mélange	Température de gravure en (°C)	Taux de gravure en (µm/min)	Surface gravée (temps de gravure)
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1	~ 20		X (2 min)
	3			
	4	~ 20		
HBr	1			X (2 min)
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1	~ 25	0.06	O (~10 min)
HCl	1		à	
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	8		0.07	
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1	~ 20	0.05	O (~30 min)
HCl	2		à	Δ (~60 min)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	3		0.07	
HNO <sub>3</sub>	1	~ 20	~ 0.15	O (~10 min)
HCl	3			Δ (~60 min)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	5			
O : état du miroir. Δ : peu rugueux. x : trop rugueux.				

Tableau 2.2 Exemples de solutions gravantes à taux rapide.

Combinaison de réactifs gravants	Rapport de mélange	Taux de gravure en ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	Surface gravée (temps de gravure)
HCl (COOH) <sub>2</sub>	18 cc 0.9 g	~ 10	X (5 min) X (45 s)
HCl CH <sub>3</sub> COOH H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1 1 0	~ 2	X (2 min)
	2 2 1	~ 1.5	O (2 min)
	1 1 1	~ 0.6	O (30 min)
	1 2 1	~ 1.2	O (30 min)
	2 1 2	0.5 à 1	O (2 min)
	2 1 4	~ 0.5	$\Delta$ (2 min)
O : état du miroir, $\Delta$ : peu rugueux, x : trop rugueux.			

D'après (Toshio et coll., 1980), la solution gravante KKI-121 est la plus performante pour la fabrication des lasers monolithiques et des circuits optiques intégrés à base de structures de Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub>/InP. La solution KKI présente des avantages majeurs pour la fabrication des lasers pour la diminution de leur courant de seuil. Plusieurs scientifiques ont jugé que la solution KKI est la plus efficace (Ishikawa et coll., 1989) pour obtenir une qualité supérieure de surface sans rugosités indésirables et sans trous dus à la gravure. En effet avec une gravure au KKI, on peut avoir des parois bien arrondies et inclinées. Cette étape est suivie d'une seconde gravure à taux bas se composant de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/HCL.

## **2.7. Conclusion**

Au cours de ce chapitre, on décrit la théorie des différents procédés utilisés au cours de ce projet ainsi que l'importance de chacun de ces procédés dans la fabrication des dispositifs lasers. Dans la chapitre suivant, on va étudier la fabrication ainsi que les méthodes de caractérisation des lasers semi-conducteurs.

## Chapitre 3

### TECHNIQUES DE FABRICATION

---

#### 3.1. Introduction

Plusieurs critères doivent être pris en compte pour le choix des techniques et des recettes adéquates pour la fabrication ainsi que le matériau efficace à partir duquel on peut fabriquer des diodes lasers répondant à nos exigences.

#### 3.2. Propriétés du matériau laser

##### 3.2.1. Critères de choix

Un matériau dont la structure quaternaire de  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  a subi une croissance sur de l'InP émet de la lumière à des longueurs d'ondes comprises entre 1.0-1.67  $\mu\text{m}$  et il s'avère que ce type de structure est prometteur pour la fabrication des circuits photoniques intégrés pour les télécommunications (Toshio et coll., 1980).

Pour faire des lasers adéquats, on avait le choix entre deux matériaux de base qui sont le GaAs (Arseniure de Galium) et l'InP (Phosphure d'Indium). En fait le facteur majeur de choix pour le matériau approprié avec lequel on doit travailler c'est que l'InP émet de la lumière à des longueurs d'ondes de l'ordre de 1.55  $\mu\text{m}$ . En effet, à cette longueur d'onde on a une transmission maximale de puissance dans la fibre optique (Merz et coll., 1976; Forouhar et coll., 1992). De plus l'InP est un matériau assez résistant aux gravures humides. C'est pourquoi le fait de se limiter aux matériaux à base de GaAs et d'InP est judicieux.

La fabrication des cavités Fabry-Perot sans les procédures de clivage usuelles est essentielle pour la réalisation des circuits optiques monolithiques intégrés dans le domaine de la technologie des lasers. La technique de gravure qu'on va adopter est celle

de la gravure humide par attaque chimique car le but est de fabriquer des facettes formant un miroir lisse et verticale. Les matériaux suivants sont les meilleures pour accomplir le but : l'AlGaAs/GaAs et l'InGaAsP/InP. Dans notre cas, les expériences précédentes ont montré que l'utilisation de l'InP est plus efficace.

En effet, si on considère le cas du AlGaAs/GaAs, ce dernier peut être gravé avec des solutions chimiques diverses telle qu'une solution de  $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$  (Boche et coll., 1996; Fourre et coll., 1996). Avec cette solution, on peut avoir des cavités verticales lisses et des surfaces cristallographiques plus facilement. Cependant, l'anisotropie cristallographique dans le processus de gravure des multicouches du  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  dépend fortement de la fraction molaire  $x$  de AlAs dans chaque couche.

En ce qui concerne l'InP, et pour des systèmes d'InGaAsP/InP, on peut utiliser plusieurs solutions gravantes, entre autres la solution KKI décrite dans le chapitre précédent.

### 3.2.2. Propriétés physiques

Avec un matériau à base d'InP tel que l'InGaAsP/InP, ce dernier peut offrir pour notre fabrication plusieurs avantages grâce aux bons atouts de la croissance de l'InGaAsP sur l'InP. L'InP de bonne qualité et ayant une densité de dislocation assez basse est le meilleur substrat sur lequel on fait croître l'InGaAsP. En plus la température de fusion de l'InP est suffisamment élevée ( $1070^\circ\text{C}$ ) pour supporter une croissance épitaxiale convenable. Des structures compliquées peuvent être préparées facilement en appliquant plusieurs étapes de croissances épitaxiale ou/avec des techniques de gravure sélectives car l'oxydation de surface de ce système pose moins de problèmes que celle des cristaux contenant de l'Al, tel que l'AlGaAs. Des surfaces lisses de l'InP peuvent être obtenues par diverses méthodes de gravure chimique. Ces avantages liés à la croissance de l'InGaAsP sur l'InP peuvent offrir plusieurs facilités de fabrication.



### 3.2.3. Avantages de l'InP pour la fabrication des diodes lasers

Les évolutions récentes en matière de gravure humide sur des structures de GaInAsP/InP peuvent fournir de grandes opportunités pour créer de nouvelles générations de dispositifs optiques intégrés dans ce matériau. On doit dire qu'un processus de gravure chimique peut remplacer les étapes de clivage pour la formation des miroirs des lasers. Par conséquent, une fois la nécessité de cliver éliminée, la porte s'ouvre pour l'intégration monolithique de dispositifs lasers complémentaires et compatibles avec ce laser. En outre, la capacité de graver une rainure étroite avec ces techniques nous offre un moyen efficace de coupler optiquement et d'une manière efficace deux dispositifs intégrés adjacents tant que l'isolation électrique est maintenue.

En utilisant une gravure humide comme technique, on peut non seulement avoir des lasers à cavités courtes, oscillant à un mode longitudinal unique et ayant des courants de seuil assez bas mais aussi on peut fabriquer des lasers avec d'autres dispositifs optiques ou électroniques sur le même substrat. À côté de tous ces avantages, l'InP est un matériau qui a un effet laser aux alentours d'une longueur d'onde de  $1.55\mu\text{m}$ .

### 3.2.4. Structure

Le matériau laser utilisé dans ce projet est une structure laser à puits quantiques provenant du Conseil National de la Recherche du Canada (CNRC) à Ottawa et plus précisément de l'Institut des Sciences des Microstructures. Le tableau 3.1 illustre la structure du matériau laser.

Tableau 3.1 Échantillon CNRC #97 138.

Matériau	Épaisseur	Concentration des dopants	Type du dopant
InGaAs	0.2 $\mu\text{m}$	$1 \times 10^{19}$	P (Be)
InP	1.38 $\mu\text{m}$	$1 \times 10^{18}$	P (Be)
InGaAsP	100 $\text{\AA}$	$5 \times 10^{17}$	P (Be)
InP	0.2 $\mu\text{m}$	$5 \times 10^{17}$	P (Be)
InGaAsP	0.05 $\mu\text{m}$	non dopé	
5 x InGaAsP	0.02 $\mu\text{m}$	non dopé	
5 x InGaAs	60 $\text{\AA}$	non dopé	
InGaAsP	0.07 $\mu\text{m}$	non dopé	
InP	1.5 $\mu\text{m}$	$1 \times 10^{18}$	n (Si)
Substrat d'InP type n			

Au CNRC, on utilise la technique CBE pour effectuer les croissances épitaxiales. L'épitaxie de ce matériau est réalisée en juillet 1997. La figure 2.1 illustre le schéma bloc d'un laser semi-conducteur à puits quantiques.

Chaque couche de la structure laser avant et après la fabrication a un rôle fondamental dans le fonctionnement de la diode. Au début, pour effectuer la croissance d'une structure laser, il faut cependant choisir des couches ayant les indices de réfraction appropriés ainsi que le dopage nécessaire pour obtenir la structure guide d'onde ainsi que la diode p-n pour l'injection de courant. Les barrières de chaque côté de la région active doivent être d'environ 0.3 eV ou plus pour assurer un confinement raisonnable de la lumière. Durant la fabrication, on désire obtenir les contacts électriques, les miroirs pour les lasers, ainsi que toute autre structure jugée nécessaire, tout en évitant de causer du dommage à la structure.

La figure 3.1 illustre la structure complète d'une diode laser après fabrication ainsi que la structure du matériau de base. En ce qui concerne les couches de contacts électriques, on a utilisé des couches de AuNiAuGeAu pour la couche de contact ohmique et des couches de AuTi pour la couche de contact Schottky. Les contacts électriques présentent aussi un support mécanique de la diode. La couche de

diélectrique  $\text{SiO}_2$  est nécessaire pour pouvoir ouvrir les lignes d'injection dans le matériau après avoir effectué la lithographie adéquate.

Le matériau utilisé au cours de ce travail est un matériau à structure quantique. En effet, les couches qui restent sont les couches de base de ce dernier, elles ont été déposées par CBE au CNRC.

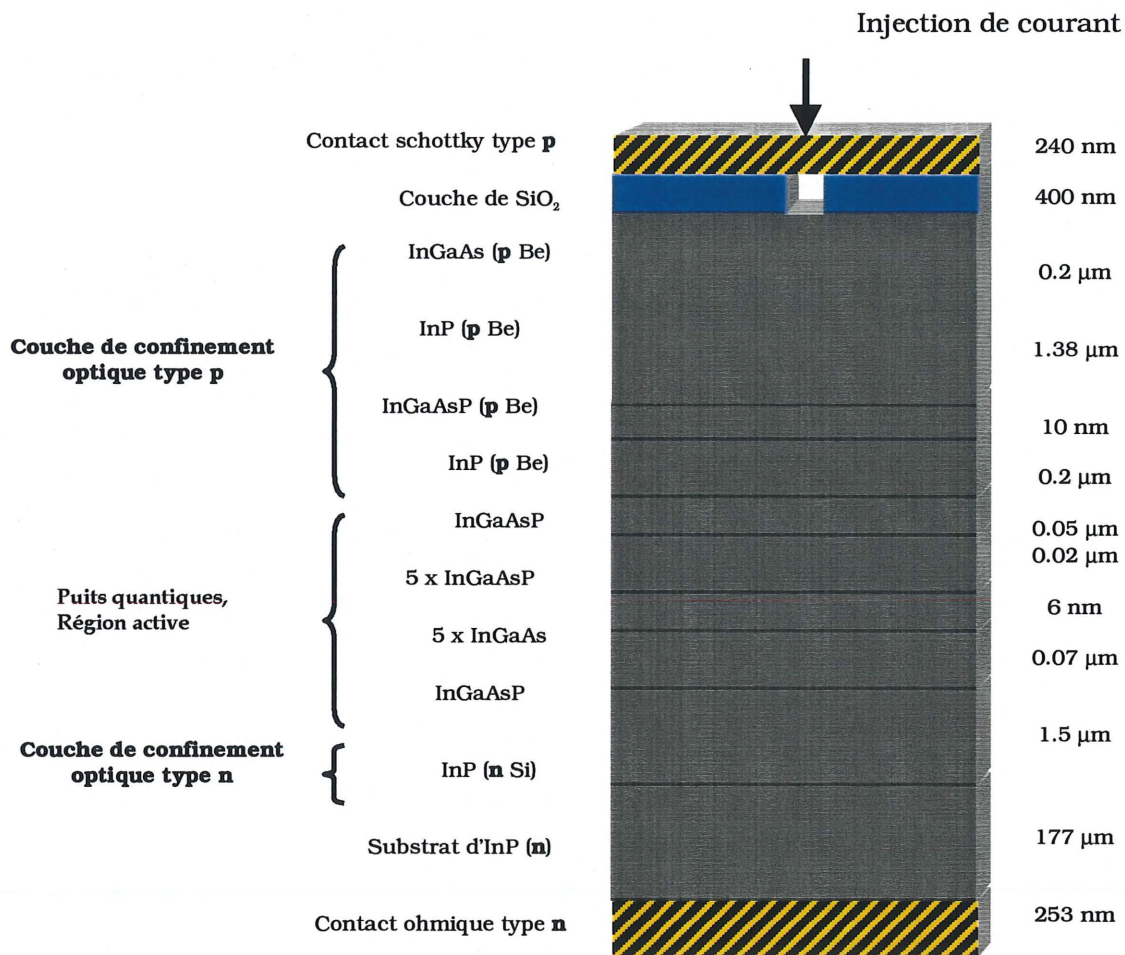


Figure 3.1. Schéma bloc d'un laser semi-conducteur de 300  $\mu\text{m}$  de largeur par 500  $\mu\text{m}$  de longueur et 180  $\mu\text{m}$  de hauteur.

Le matériau de base se compose d'un empilement de couches réalisé par épitaxie sur un substrat d'InP. La couche en bas de la structure représente le substrat d'InP de type n. La couche d'InP dopée avec du Si est une couche de confinement optique de

type n et d'autre part les différentes couches d'InGaAs, d'InP et d'InGaAsP dopées p forment la couche de confinement optique type p. Les deux couches de confinement entourent les couches englobant les puits quantiques et la région active.

### **3.3. Étapes de fabrication**

#### **3.3.1. Recettes de nettoyage**

Le nettoyage du matériau est une étape répétitive et fondamentale du procédé de fabrication. La recette du nettoyage dépend généralement de l'étape de fabrication précédente ou suivante. En effet, la première étape qui suit le découpage d'un échantillon est de le nettoyer pour le préparer à l'oxydation et ceci en le trempant dans une solution de trichloroéthylène, puis le rincer à l'eau déionisée ensuite l'immerger dans une solution d'acétone suivie par une solution de méthanol, enfin le tremper dans une solution d'alcool isopropylique IPA et finalement le sécher à l'azote. Cette procédure de nettoyage est la recette la plus commune utilisée pour ce travail sur des structures à base d'InP épitaxiées par CBE. Ce nettoyage est appliqué avant chaque étape du procédé de fabrication, cependant l'immersion dans le trichloroéthylène est optionnelle dans les étapes qui suivent la première oxydation sauf après l'amincissement où on doit utiliser le trichloroéthylène pour faire dissoudre la cire.

#### **3.3.2. Déposition du SiO<sub>2</sub> par PECVD**

L'isolant utilisé dans la fabrication des lasers semi-conducteurs est une couche d'oxyde de silicium SiO<sub>2</sub> d'épaisseur variant entre 300nm à 500nm déposée à température ambiante par PECVD : déposition en phase vapeur assistée par plasma. Le plasma est utile pour générer des espèces réactives aux températures réduites. Le SiH<sub>4</sub> et le N<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sous forme gazeuse réagissent pour engendrer la déposition du SiO<sub>2</sub>. Pour mesurer l'épaisseur obtenue d'oxyde de silicium, deux méthodes sont utilisées. La première consiste à utiliser un morceau de silicium qui a subi la même déposition que

l'échantillon concerné et mesurer l'épaisseur d'oxyde de silicium sur ce morceau en se servant de l'ellipsomètre et des abaques. La deuxième méthode moins précise consiste à observer au microscope optique la couleur de l'oxyde de silicium déposé sur le morceau de silicium et d'en déduire l'épaisseur appropriée à l'aide du code de couleurs.

Ce dépôt représente l'étape qui précède généralement la lithographie. Dans ce travail, on a eu recours à deux types de lithographies : la lithographie par faisceau d'électrons et la photolithographie.

### 3.3.3. Lithographie par faisceaux d'électrons

Avant d'entamer la phase de lithographie, une couche de résine PMMA 12% doit être étalée sur l'échantillon. On étale la PMMA à une vitesse de 5000 tours pendant 20 secondes. Ensuite, l'échantillon doit subir un étuvage pendant au moins une heure à 180°C.

La lithographie par faisceaux d'électrons se réalise dans des conditions spécifiques et dépendant de la nature du masque à exposer ainsi que de ses dimensions (Ils et coll., 1994; Tennant et coll., 1993). En effet, pour exposer un masque servant à la fabrication des lasers semi-conducteurs, il faut commencer par le dessiner à l'aide d'un logiciel de design. Ensuite, il faut convertir le fichier contenant le masque en un fichier NPGS exploitable par le microscope électronique à balayage. Dans le fichier NPGS, il faut se fixer plusieurs paramètres telles que la dose de courant nécessaire à l'exposition. Pour tous les masques utilisés dans la lithographie par faisceaux d'électrons, on s'est fixé une dose d'électrons de  $225 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ . Les figures 3.2, 3.3 et 3.4 illustrent les différents masques réalisés par DesignCad 2D et utilisés pour la fabrication des diodes laser semi-conductrices. Les masques des figures 3.2 et 3.3 sont utilisés pour la gravure humide à base de la solution KKI. Les masques de la figure 3.3 sont utilisés pour fabriquer des diodes laser à différentes largeurs de lignes d'injection. Toutes les expositions sont réalisées sous une énergie de 30 KeV.

### 3.3.3.1. Design des masques et alignement

Dans ce travail, les masques utilisés pour réaliser les gravures humides et la réalisation des alignements adéquats par la suite sont faits par le logiciel de design *DesignCad 2D* (Unger et coll., 1994). La figure 3.2 illustre les dimensions du premier masque utilisé ainsi que le positionnement des différentes marques d'alignement. Dans une exposition par faisceaux d'électrons réalisée ici, les dimensions maximales d'un masque sont de 2000 $\mu\text{m}$  par 2000 $\mu\text{m}$ . Le masque utilisé se compose d'un réseau de doubles lignes. Les doubles lignes sont de 2000 $\mu\text{m}$  de longueur par 15 $\mu\text{m}$  de largeur. Ces lignes sont séparées par un espace de 10 $\mu\text{m}$ . Dans cet espace on exposera le deuxième masque qui représentera les lignes d'injection de 10 $\mu\text{m}$  de largeur environ. Les doubles lignes sont distancées de 300 $\mu\text{m}$ . En ce qui concerne les marques d'alignement, ces dernières représentent un moyen efficace pour s'aligner sur le même échantillon et exposer les lignes centrales exactement entre les doubles lignes.

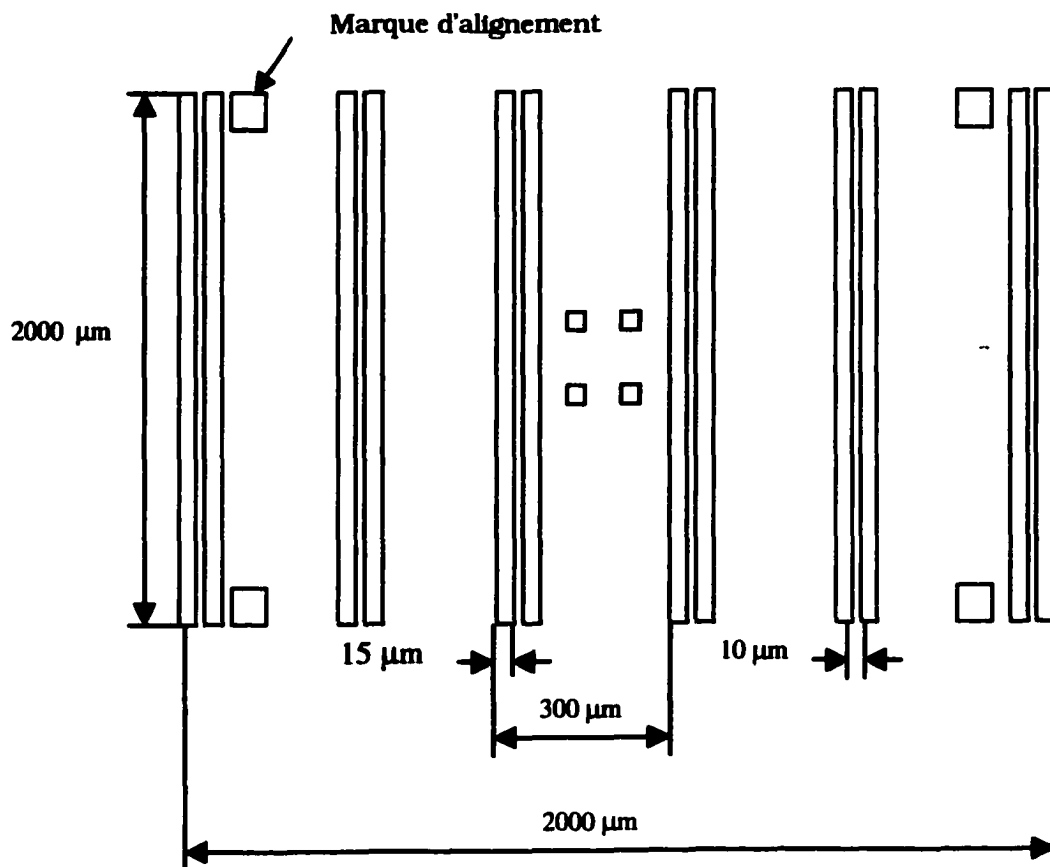


Figure 3.2. Premier masque utilisé pour les lithographies par faisceaux d'électrons.

La figure 3.3 représente le deuxième masque qui contient les lignes d'injection. Ces lignes sont de 10 μm de largeur mais cette largeur restera toujours variable et dépendante des résultats de la gravure humide. En effet, après la gravure on peut arriver à une largeur de crête de l'ordre de 7 à 8 μm. Le fichier de ce masque est flexible et facile à modifier.

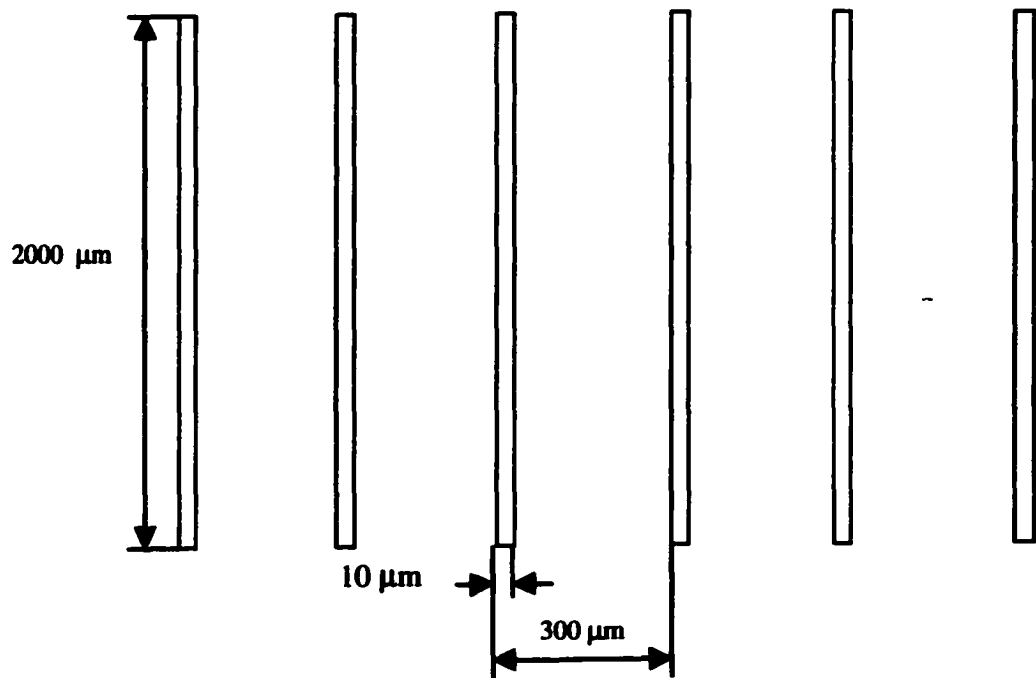


Figure 3.3. Deuxième masque exposé après alignement.

La figure 3.4 illustre les différents masques réalisés pour fabriquer des lasers à différentes largeurs de lignes d'injection. Le but de ces masques est d'interpréter l'impact des dimensions des lignes d'injection sur l'évolution du courant de seuil du composant.



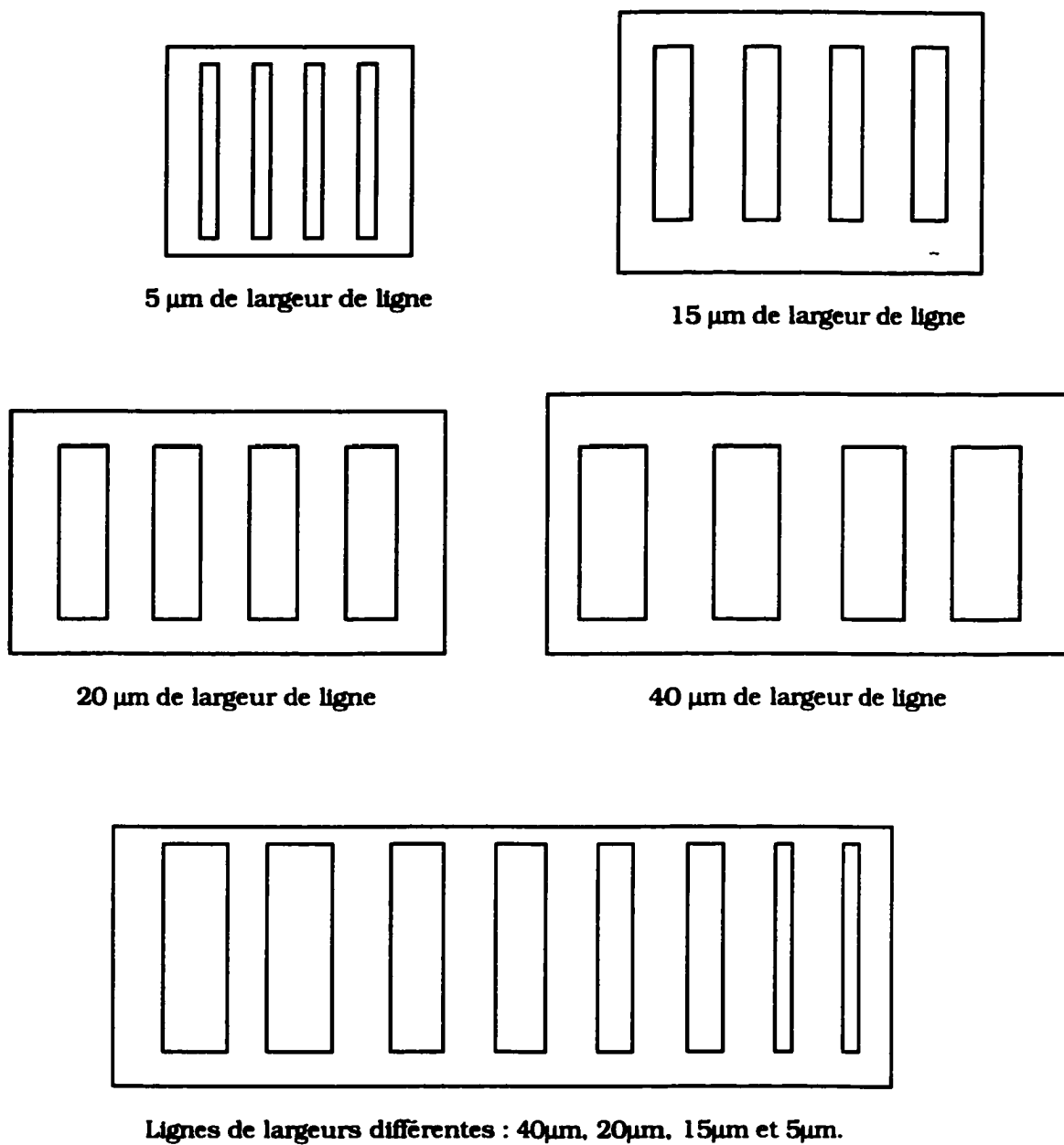


Figure 3.4. Masques à différentes largeurs de raies d'injection.

### 3.3.3.2. Développement

Après une lithographie par faisceaux d'électrons, la résine doit être développée sous des conditions spécifiques. En effet, l'échantillon concerné est trempé dans une solution d'IPA/H<sub>2</sub>O (9:1) à 23°C pendant une minute au moins. Le développement de la PMMA consiste à dissoudre les régions exposées dans une solution moitié acétone moitié méthyl-éthyl-kétone (MEK).

Lors de ce projet, la lithographie par faisceaux d'électrons a présenté une partie considérable de la recherche mais sans succès du au PMMA qui n'a pas résisté aux attaques chimiques des acides lors des gravures humides. Cependant, il s'avère que le même procédé de fabrication est reproductible par la photolithographie, c'est pourquoi on a utilisé cette dernière comme deuxième alternative de lithographie.

### 3.3.4. Photolithographie

La photolithographie est un procédé de lithographie utilisant une image optique et une pellicule sensible pour reproduire le motif sur le substrat. La pellicule déposée sur le substrat est appelée photorésine. L'exposition à une radiation d'énergie appropriée change la solubilité de la résine. Lorsque les parties exposées de la résine sont solubles après l'exposition, la résine est appelée résine positive. Cette dernière est à base d'agents sensibilisateurs faits d'hydrocarbures cycliques avec des liaisons N<sub>2</sub>. Les parties de cette résine sont ensuite dissoutes dans une solution chimique, laissant sans protection la surface du substrat. Il existe aussi des résines négatives dont la dissolution est au contraire impossible après être exposées aux radiations. Les résines négatives sont à base de polyisoprène sous forme de caoutchouc cyclique. La résine restant sur la surface doit évidemment résister aux traitements ultérieurs. La figure 3.5 illustre la séquence d'opérations de photolithographie :

- Application de la photorésine sur toute la surface du substrat,

- Exposition à une radiation à travers un masque qui change la solubilité de la résine. L'exposition augmente la solubilité de la résine positive,
- Développement de la photorésine pour dissoudre les régions exposées (résine positive),
- Traitement de la surface libre de résine (gravure, déposition de métaux, implantation, etc.).
- Dissolution complète de la résine.

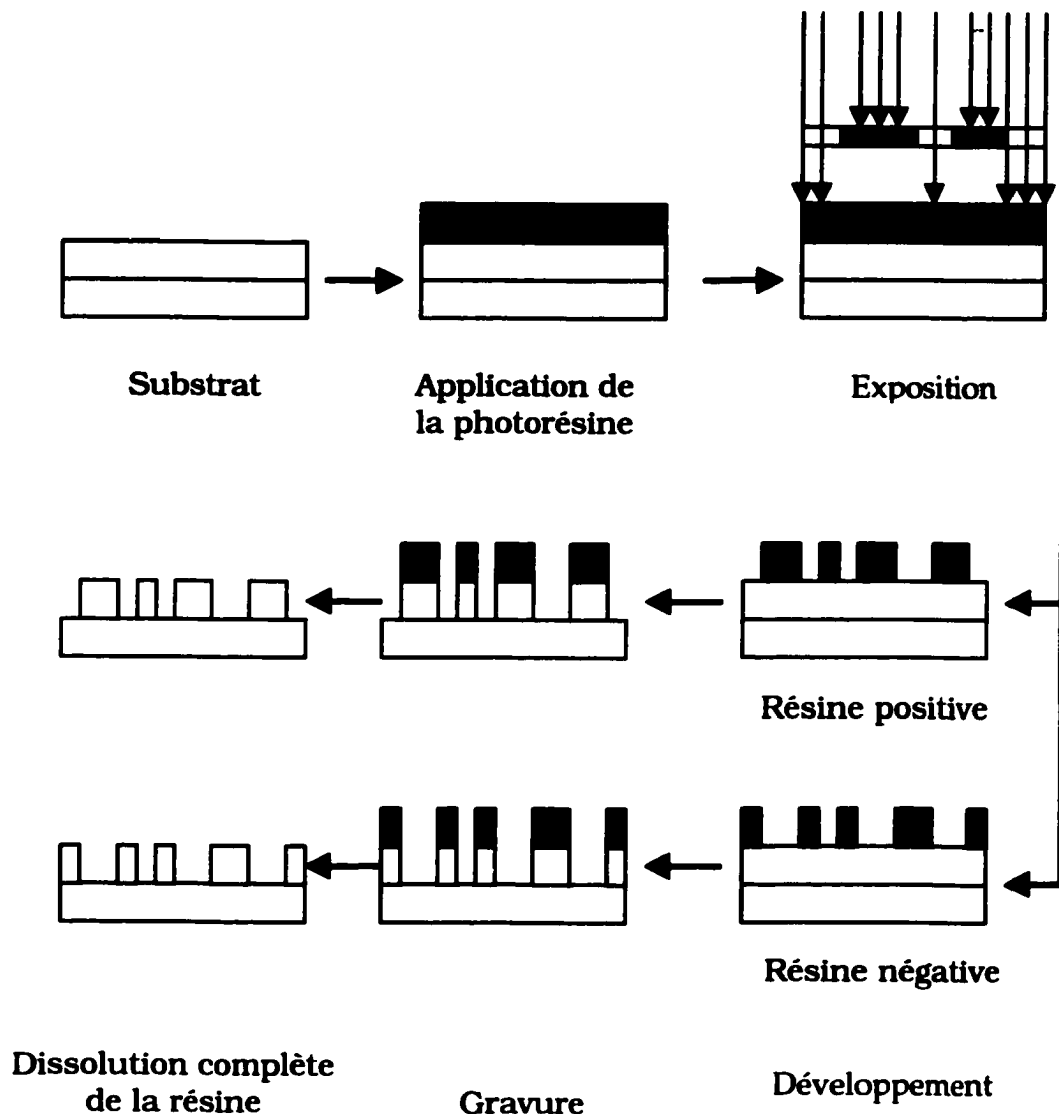


Figure 3.5. Illustration de la séquence du procédé de la photolithographie.

Dans ce projet, l'étalement de la photorésine s'est réalisé par effet centrifuge à l'aide du touret et ceci pendant 10 secondes à une vitesse de 7000 tours/min pour obtenir des couches de résine assez uniformes et des épaisseurs reproductibles d'un échantillon à un autre, généralement inférieur au micron. Le choix du temps d'étalement est fondamental car il garantit l'adhérence de la résine à la surface du substrat. Ensuite, les échantillons doivent être recuits pendant 7 minutes à 100°C.

#### 3.3.4.1. Design des masques

Les masques utilisés pour la photolithographie ont été conçus et réalisés sur place à l'Université de Sherbrooke et les motifs sont les mêmes que ceux utilisés en lithographie par faisceaux d'électrons sauf que la différence se situe au niveau des dimensions.

#### 3.3.4.2. Exposition optique et développement

Les résines sont sensibles aux rayonnements de longueurs d'onde 300-500 nm. La lumière dont la longueur d'onde est au-dessous de 500 nm est donc filtrée dans les salles de photolithographie ; le traitement est sous lumière jaune. L'intensité d'exposition doit être suffisante pour le degré de polymérisation des résines négatives. Cependant, une très forte intensité dégrade la qualité du motif. Les résines négatives ont une apparence de peau d'orange lorsqu'elles ne sont pas suffisamment exposées. L'intensité optimale est alors réglée à +10% de sa valeur donnant l'apparence de peau d'orange.

Lors des expositions de la résine positive, ces derniers ont duré de 35 à 40 secondes. Après l'exposition des échantillons aux ultraviolets, on passe au développement de la résine. Pour les résines positives, le développement dépend de la durée d'exposition et de la concentration du développeur. La réaction de développement ajoute une certaine difficulté au procédé basé sur les résines positives. Les dimensions des motifs imprimés peuvent être altérées par le temps de

développement. Les résines positives exposées peuvent être dissoutes dans une solution alcaline comme l'hydroxyde de sodium dilué.

Quant aux résines négatives, leur durée d'exposition dépend de l'application. Le développeur pour les résines négatives est un mélange d'hydrocarbures. Le solvant utilisé est un mélange d'hydrocarbures aryle ou aliphatique.

Le temps de développement des résines positives est de 30 à 40 secondes. Après le développement, les échantillons doivent être recuits pendant 15 minutes à 125°C. Ensuite, une fois que les motifs de résines sont faits, on passe à l'étape du traitement de la surface par l'intermédiaire des gravures.

### 3.3.5. Recettes de gravure

La solution de gravure dépend de la nature de la surface à graver. Au début, on doit graver la couche d'oxyde de silicium et ceci après le développement et le recuit de la résine. La solution gravante du  $\text{SiO}_2$  est généralement du BOE ou du BOE dilué dans du  $\text{H}_2\text{O}$ . La solution utilisée pour graver l'oxyde déposé sur les échantillons qui ont subi une lithographie par faisceaux d'électrons est composée de BOE :  $\text{H}_2\text{O}$  1:2 dont la vitesse de gravure est d'environ 600nm/min et par conséquent le temps nécessaire pour une gravure dépend de l'épaisseur du  $\text{SiO}_2$  à graver. La solution utilisée pour graver les couches d'oxyde déposées sur les échantillons qui ont subi une photolithographie est du BOE dont la vitesse de gravure est d'environ 1000nm/min.

Avant de passer à la seconde étape de gravure, la couche de résine (photorésine ou PMMA) doit être nettoyée. La photorésine est dissoute dans l'acétone pendant 2 à 3 minutes, ensuite on trempe l'échantillon dans une solution de méthanol pendant 2 à 3 minutes suivi d'une immersion dans une solution d'alcool isopropylique pendant 2 à 3 minutes et finalement le séchage à l'azote. Quant à la résine PMMA, l'échantillon concerné est trempé dans une solution moitié acétone moitié MEK pendant 30 à 60

minutes. Ensuite, les étapes suivantes sont les mêmes que celles utilisées pour la photorésine.

Deux solutions gravantes sont utilisées dans cette étape de gravure humide dans les hétérostructures du matériau laser utilisé. D'après (Toshio et coll.), la solution gravante composée d'acide acétique, d'acide chlorhydrique, de peroxyde d'hydrogène et d'eau en des proportions appropriées est la meilleure pour la fabrication des lasers monolithiques à base de structures quaternaires de  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$ . La solution KKI présente des avantages majeurs pour la fabrication des lasers et ceci dans le but de diminuer leur courant de seuil. Plusieurs scientifiques ont jugé que la solution KKI est la plus efficace (Joji et coll.) pour obtenir une qualité supérieure de surface sans rugosités indésirables et sans trous dus à la gravure. En effet, avec une gravure au KKI, on peut avoir des parois bien arrondies et inclinées. La solution KKI engendre une gravure à taux élevé. Cette étape est suivie d'une seconde gravure à taux bas se composant de  $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{HCl}$ . La solution KKI qu'on a utilisé dans ce projet est composée de  $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$  40:20:3:15. Cette solution est efficace à notre application lorsqu'elle est refroidie à  $10^\circ\text{C}$  et idéalement à  $5.5^\circ\text{C}$ , son taux de gravure est de  $1810\text{nm}/\text{min}$  et elle grave profondément dans notre matériau laser à puits quantiques. En seconde étape, la solution de  $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{HCl}$  1:1 est utilisée à température de la pièce pour rendre les parois plus verticales dans le sens de la première gravure et elle est sensée s'arrêter à la couche d' $\text{InGaAsP}$ . Elle se distingue par un taux de gravure faible de l'ordre de  $435\text{ nm}/\text{min}$ . Les résultats de cette gravure seront présentés dans le chapitre suivant de ce mémoire.

Une fois que la gravure est réussie, on refait un second dépôt de  $\text{SiO}_2$  généralement dans les mêmes conditions que le premier dépôt pour pouvoir ouvrir les lignes d'injection correspondant à la largeur de la crête obtenue après la gravure humide. On étale une seconde fois la photorésine ou la PMMA selon la lithographie qu'on va utiliser par la suite et ceci dans les mêmes conditions que la première fois. Ensuite on procède à l'étape d'alignement. Le but de l'alignement est d'exposer les lignes centrales d'injection

avec une très grande précision, en effet ces lignes sont de largeurs inférieures ou égales à  $10\mu\text{m}$ .

Le fait d'avoir des lignes d'injection de largeurs inférieures ou égales à  $10\mu\text{m}$  nous permet d'atteindre le but du projet qui est la fabrication d'un guide d'onde à guidage par indice de réfraction effectif. Ce guidage est provoqué par la variation de l'indice de réfraction effectif dû à la différence des épaisseurs des différentes couches du matériau. Par conséquent, on peut fabriquer des lasers semi-conducteurs monomodes ayant un courant de seuil bas pour fonctionner à des températures élevées et même avec des courants continus et ceci en se basant sur le même principe de guidage. Avec un guidage par indice de réfraction effectif, on a tendance à confiner de la lumière dans une raie très étroite ( $\leq 10\mu\text{m}$ ) et par conséquent réduire le courant de seuil. On a eu recours à un guidage par indice de réfraction effectif car avec le guidage par le gain on a un astigmatisme du faisceau et une augmentation considérable du courant de seuil à cause de la ventilation du courant. En plus, avec ce guidage on a des difficultés de focalisation du faisceau. Tandis qu'avec un guidage par indice de réfraction effectif, la lumière est confinée latéralement dans le guide d'onde, ceci améliore la qualité modale du faisceau à la sortie et augmente l'efficacité de couplage à des fibres optiques. Le principe de confinement dans un guidage par indice de réfraction effectif est semblable à celui d'une fibre optique; au-dessous de la crête ou «ridge» on a un indice de réfraction supérieur à celui des régions gravées. Par conséquent, la lumière a de grandes probabilités de confinement dans la zone ayant l'indice de réfraction le plus élevé. Après la gravure, la largeur de la crête est de  $10\mu\text{m}$  ou moins. Avec une telle gravure, on aura une diminution du courant de seuil tout en conservant la même densité de courant.

Après l'exposition des lignes d'injection centrales, on grave encore une fois l'oxyde de silicium avec les mêmes principes de gravure utilisés auparavant. Cette étape est suivie d'un nettoyage complet de la résine positive ou de la résine PMMA suivant les recettes de nettoyage expliquées auparavant. Puis l'échantillon doit être préparé pour l'amincissement.

### 3.3.6. Amincissement

L'amincissement est un procédé fondamental dans la fabrication des diodes lasers semi-conductrices pour pouvoir cliver l'échantillon laser avec plus de facilité. En effet, il se réalise en deux étapes : un amincissement mécanique suivi par un polissage chimique. Au début, les échantillons qu'on a utilisés ont une épaisseur de 420µm et le but de l'amincissement est de réduire cette épaisseur à une valeur entre 150µm et 200µm. De ce fait, l'échantillon est collé avec de la cire sur un support en laiton du côté des lignes d'injection. Le premier amincissement se réalise avec des grains de poudre d'alumine de taille 9.5µm mélangés avec de l'eau déionisée sur une plaque de verre. Ensuite, on amincit avec des grains de poudre d'alumine de 1µm de taille et ceci pour lisser au maximum le substrat jusqu'à aboutir à un miroir luisant. Ensuite, l'échantillon est traité dans une solution de trichloroéthylène dans le but de dissoudre la cire collée à l'échantillon. L'échantillon est collé sur une lame de verre avec de la photorésine et le tout est trempé dans une solution d'acide phosphorique et d'acide chlorhydrique. La solution  $H_3PO_4/HCl$  3:1 polit la surface du matériau du côté du substrat d'InP est ceci avec une vitesse de gravure par polissage de 1µm/min. En effet, pour la majorité des échantillons utilisés le long de ce projet l'épaisseur après amincissement mécanique est de 180µm et avec un polissage à l'acide de 20 à 30 minutes, nous avons obtenu une épaisseur de 150µm. Cette étape est suivie de l'évaporation des deux types de contacts : ohmique et Schottky.

### 3.3.7. Contacts

Les contacts ou les métallisations des couches de contact se réalisent par évaporation sous vide dans les salles propres du Département de physique de l'Université de Sherbrooke en utilisant un système d'évaporation par canon d'électrons. Les aires métallisées servent à effectuer les caractérisations nécessaires au niveau du composant.



### 3.3.7.1. Contact Ohmique

La recette utilisée pour réaliser les contacts ohmiques de type n des dispositifs fabriqués dans ce projet est représenté par le tableau 3.2.

Tableau 3.2 Couches métalliques du contact ohmique type n .

<b>Contact ohmique type n</b>		
Épaisseurs en nm	Symbole du métal évaporé	Nom du métal évaporé
200	Au	Or
11	Ni	Nickel
14	Au	Or
14	Ge	Germanium
14	Au	Or
<b>InP</b>		

### 3.3.7.2. Contact Schottky

La recette utilisée pour réaliser les contacts Schottky de type p dans ce projet est illustrée par le tableau 3.3.

Tableau 3.3 Couches métalliques du contact Schottky type p.

<b>Contact Schottky type p</b>		
Épaisseurs en nm	Symbole du métal évaporé	Nom du métal évaporé
170	Au	Or
70	Ti	Titane
<b>InGaAs</b>		

### 3.3.8. Recuit d'alliage

Le recuit d'alliage suit la déposition des couches métalliques et ceci pour faire diffuser le contact ohmique de type n dans le semi-conducteur. Le recuit de tous les échantillons s'est réalisé à 350°C pendant une minute.

### 3.3.9. Clivage

Une fois que toutes les étapes de fabrication sont achevées, un clivage de l'échantillon est nécessaire pour réaliser les faces miroir de la cavité optique de chaque diode laser semi-conductrice. La figure 3.6 explique les étapes de clivage des échantillons lasers.

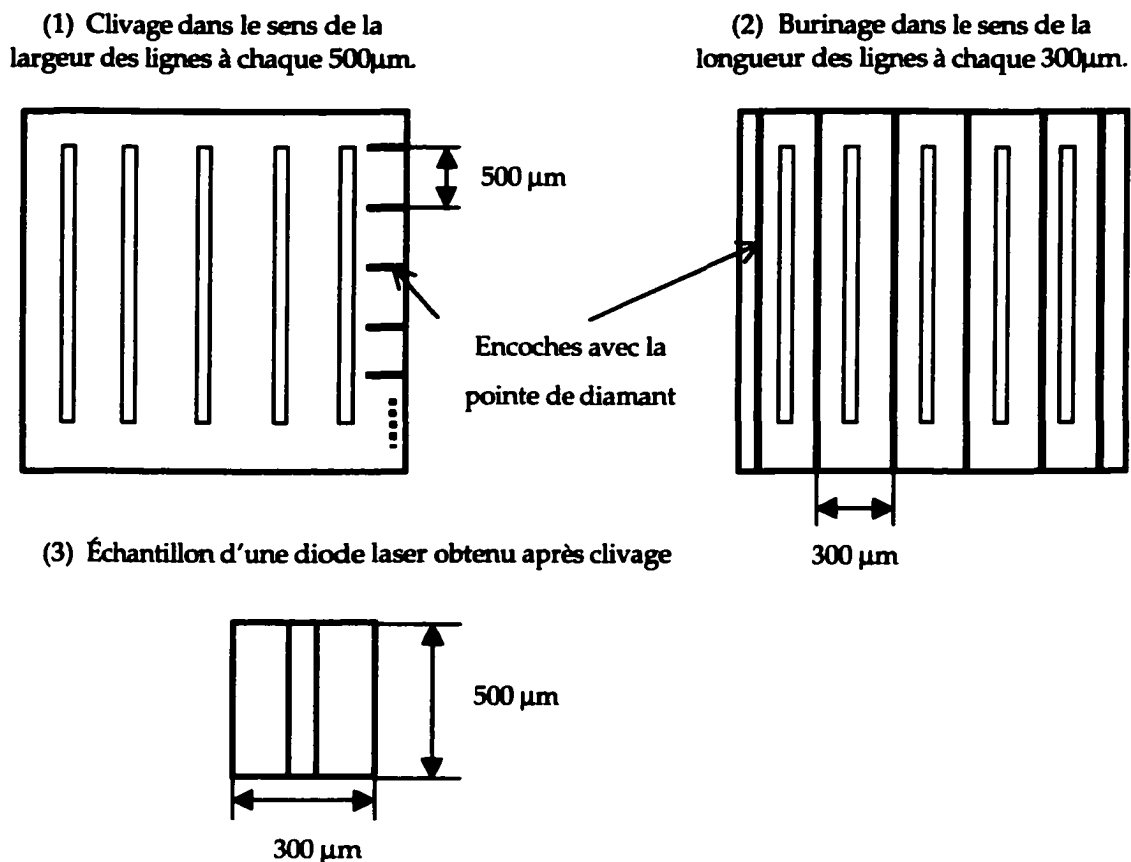


Figure 3.6. Étapes de clivage d'un échantillon laser.

### 3.3.10. Caractérisation

La caractérisation des diodes lasers semi-conductrices se divise en deux catégories : la caractérisation électrique et la caractérisation optique. En effet, avant de passer aux tests électriques il faut s'assurer que le matériau obéit à nos exigences de point de vue propriétés optiques et ceci en réalisant une mesure de photoluminescence. Lorsque les porteurs sont excités par absorption de photons, la radiation engendrée par les recombinaisons des porteurs excités est appelée *photoluminescence*. Par la suite après avoir appliqué toutes les étapes nécessaires de fabrication, on effectue les tests de nature électriques tel que l'analyse de la caractéristique de courant versus la tension reflétant la bonne fonctionnalité des contacts métalliques. Une fois que le composant reflète une bonne fonctionnalité électrique, on peut appliquer les tests de luminescence pour interpréter les propriétés d'émission de la lumière du composant tel que l'électroluminescence. Si l'excitation est provoquée par l'injection de courant dans l'échantillon, le résultat de la luminescence est appelé *électroluminescence*.

#### 3.3.10.1. Photoluminescence

La photoluminescence (PL) est une technique non destructive pour la détermination de certaines impuretés dans le semi-conducteur (Garbuzov et coll., 1995). Elle est particulièrement utilisée pour la détection des niveaux d'impuretés peu profonds mais elle peut être applicable pour certains cas de niveaux profonds d'impuretés. En outre, l'identification des impuretés est assez facile avec la PL tandis que la mesure de leurs concentrations est plus difficile. La PL peut fournir des informations simultanées sur plusieurs types d'impuretés dans le matériau concerné. Cependant, seulement les impuretés produisant des recombinaisons radiatives sont détectables au cours de la PL. La figure 3.7 illustre un système typique de mesure de la PL. L'échantillon est placé dans un cryostat. Des mesures à des basses températures sont nécessaires pour extraire toute l'information spectroscopique en minimisant les recombinaisons non radiatives activées thermiquement.

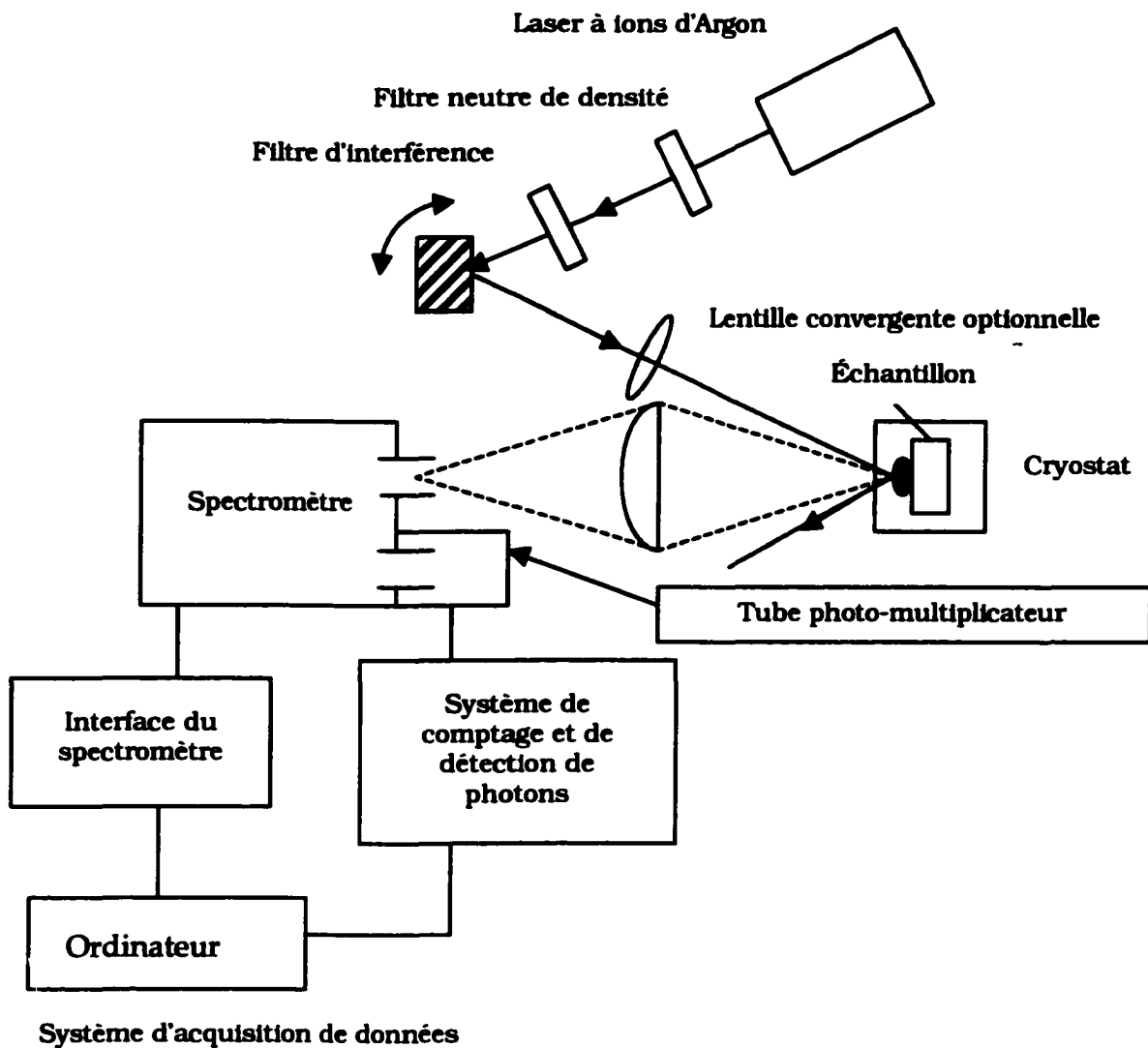


Figure 3.7. Schéma bloc type d'un système de mesure de la photoluminescence.

L'échantillon est excité par l'intermédiaire d'une source optique, typiquement un laser dont l'énergie  $h\nu > E_g$ . Pour avoir de bonnes mesures de PL, la majorité des recombinaisons doivent être radiatives. La lumière émise de l'échantillon par PL est analysée par un spectromètre et détectée par un photo-détecteur. À la sortie, le spectre doit être traité directement par un système d'acquisition de données.

### 3.3.10.2.Électroluminescence

Les tests d'électroluminescence sont valables dès que les tests électriques effectués sur le dispositif sont valides. L'électroluminescence consiste à générer des photons en faisant passer un courant électrique dans le dispositif (Zadavil et coll., 1997). En ce qui concerne les lasers semi-conducteurs, il s'agit de tester la fonctionnalité du dispositif en mode laser et son courant de seuil. Typiquement pour un laser ayant une ligne d'injection de largeur  $70\text{ }\mu\text{m}$  et une cavité de longueur  $500\text{ }\mu\text{m}$ , la densité de courant est d'environ  $2000\text{ A/cm}^2$  dans notre cas. Cependant, il est préférable de réaliser les mesures avec des impulsions de courant car une alimentation en continue risque de provoquer un échauffement très rapide du dispositif et par conséquent engendre une augmentation de son courant de seuil ce qui le détruira.

Pour minimiser l'échauffement de l'échantillon, les tests sont effectués avec des impulsions de courant très courtes de l'ordre de  $200\text{ ns}$  avec un rapport cyclique de 500. Le courant de seuil d'un laser est déduit à partir d'une caractéristique L-I (lumière émise en fonction du courant). La caractéristique L-I d'un laser semi-conducteur se divise en deux parties, à gauche, on trouve la partie qui correspond au mode d'une diode électroluminescente et à droite on trouve le mode laser. La valeur du courant de seuil du dispositif laser est obtenue en extrapolant la partie de droite de la courbe, sur l'axe des abscisses pour obtenir une valeur en ampères. La pente de la caractéristique pour l'émission stimulée correspond à l'efficacité du dispositif en termes de transformation du courant électrique en lumière.

Pour déterminer la longueur d'onde de l'émission laser, on focalise le signal émis de la diode dans un spectromètre à la sortie duquel on installe un détecteur. On peut ainsi analyser le spectre d'émission et étudier les différents modes émis.

### **3.4. Conclusion**

Dans cette partie, plusieurs techniques et moyens de fabrication ont été exposés et décrits. Pour la fabrication des dispositifs lasers, trois étapes sont indispensables : le choix du matériau laser adéquat, l'adoption des techniques efficaces de fabrication et la caractérisation des dispositifs fabriqués.

Après l'illustration détaillée des différentes techniques de fabrication, on va exposer et discuter les résultats des travaux effectués lors de ce projet dans le chapitre suivant.

## **Chapitre 4**

### **DISCUSSIONS DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX**

---

#### **4.1. Introduction**

Les travaux effectués au cours de mon projet de maîtrise ont porté sur le développement et le perfectionnement des méthodes de fabrication des dispositifs laser dans le but majeur de diminuer le courant de seuil des dispositifs laser fabriqués avec du matériau laser à base de structures d'InP.

En particulier, le premier objectif de ce travail est de développer les méthodes de gravure humide pour aboutir à des dispositifs laser possédant les caractéristiques suivantes: meilleur confinement latéral de la lumière dans une raie de dimension inférieure ou égale à 10  $\mu\text{m}$  par un guidage par indice de réfraction, amélioration de la qualité modale et efficacité de couplage dans les fibres et par conséquent réduction du courant de seuil.

La seconde partie de ce travail consistait à effectuer des essais multiples pour la fabrication de diodes lasers à différentes largeurs de lignes d'injection et ceci en adoptant les deux méthodes de lithographie. Ainsi des tests d'électroluminescence ont été réalisés sur les dispositifs fabriqués. Ensuite un nouveau montage a été mis au point pour mesurer les diagrammes de rayonnement en champ lointain des diodes lasers fabriquées.

#### **4.2. Résultats de la gravure humide**

Au cours de cette partie du projet, deux types de gravure sont considérées : la gravure humide dans l'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) et celle dans les couches épitaxiées à structures quantiques. La première gravure concerne la couche du diélectrique et facilite la deuxième gravure qui concerne les hétérostructures épitaxiées sur un substrat d'InP.

Cette deuxième gravure se réalise en deux étapes : une première gravure rapide à taux élevé et une seconde lente à taux faible. La figure 4.1 illustre les deux types de gravure considérés.

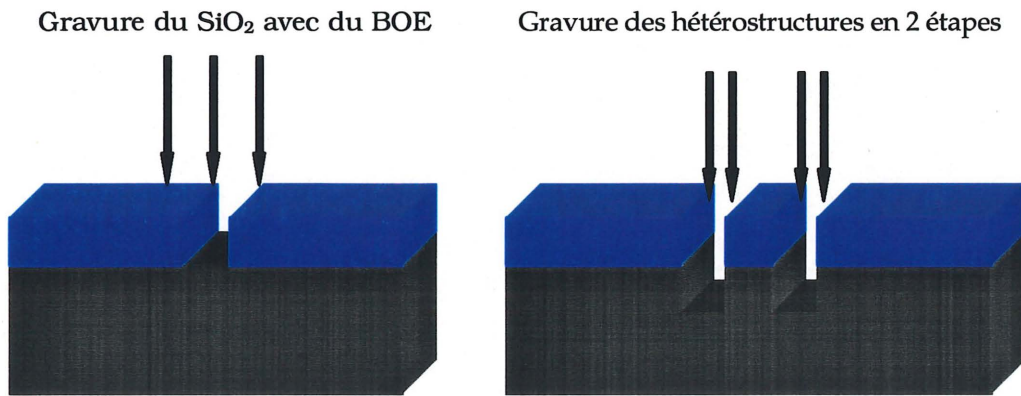


Figure 4.1. Types de gravure humide.

Avant d'appliquer la gravure humide dans les hétérostructures, on doit graver dans la couche de  $\text{SiO}_2$  avec du BOE. La figure 4.2 illustre le profil du matériau après une gravure humide dans la couche de dioxyde de silicium. En effet, grâce à cette gravure on peut en déduire l'épaisseur réelle de la couche de  $\text{SiO}_2$  déposée par le procédé de PECVD. Dans notre cas l'épaisseur de l'oxyde est de l'ordre de 290 nm.

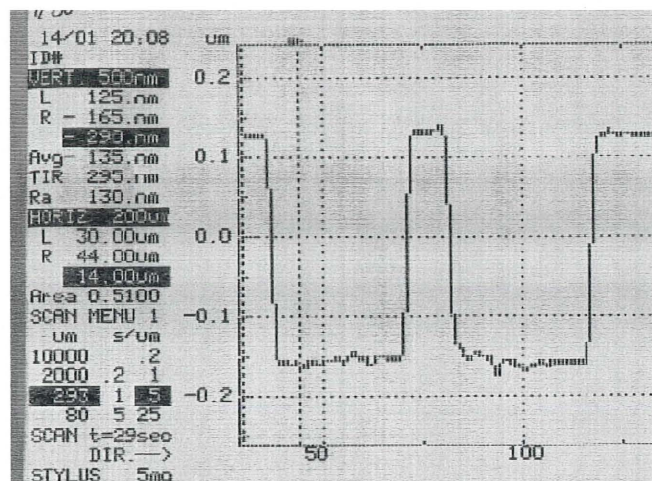


Figure 4.2. Profil de la couche de  $\text{SiO}_2$  après une gravure au BOE.



Pour valider l'efficacité de la recette de la gravure humide dans les hétérostructures, on a effectué des essais sur des échantillons qui ont subi des lithographies par faisceaux d'électrons et d'autres essais sur des échantillons qui ont subi des photolithographies.

#### 4.2.1. Résultats de la lithographie par faisceaux d'électrons

La première partie de ce travail consiste à appliquer la recette de la gravure humide dans les hétérostructures d'un matériau laser qui a subi des lithographies par faisceaux d'électrons. Suite à des essais multiples, on a remarqué qu'il y a une certaine incompatibilité entre la résine utilisée et les solutions de gravure. En effet, deux facteurs majeurs ont engendré l'échec de la gravure humide sur des échantillons qui ont subi une lithographie par faisceaux d'électrons: la PMMA qui n'a pas résisté aux solutions acides et la mauvaise qualité des masques utilisés, ceci a donné des profils de gravure différents de ce qu'on avait prévu. Des images prises au microscope électronique illustrent d'une manière détaillée le résultat de la gravure humide. Les images de la figure 4.3 montrent bien un angle de  $45^\circ$  entre le profil de la gravure et la verticale, en plus, on observe bien sur l'image (2) que la couche du diélectrique ( $\text{SiO}_2$ ) est soulevée à cause de la non résistivité de la PMMA aux acides utilisés. L'angle de  $45^\circ$  est toujours présent quelle que soit l'orientation cristalline adoptée pour réaliser la gravure.

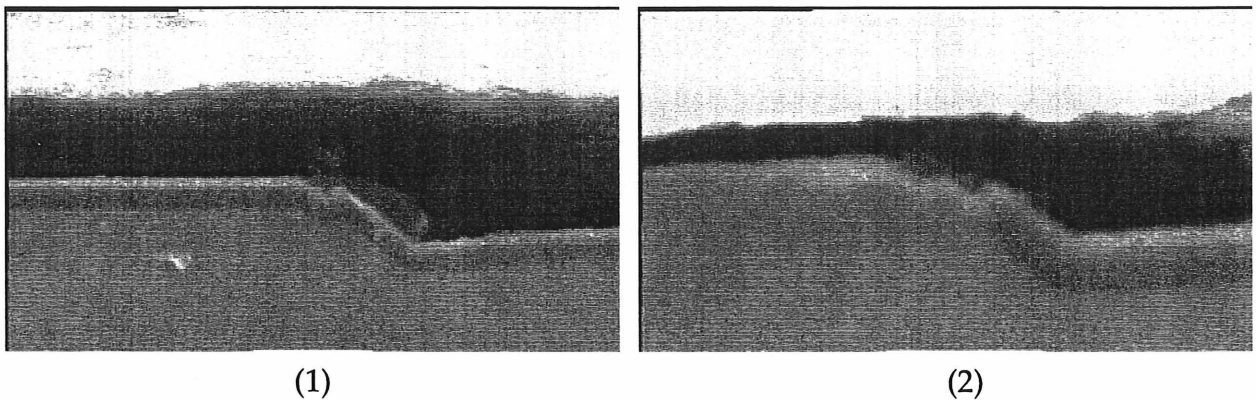


Figure 4.3. Profil de la gravure humide suite à une lithographie par faisceaux d'électrons.

Suite aux résultats non prometteurs de la gravure humide sur des échantillons qui ont subi une lithographie par faisceaux d'électrons, nous avons adopté comme deuxième alternative, la photolithographie.

#### 4.2.2. Résultats de la photolithographie

Suite à des essais de gravure humide sur des échantillons qui ont subi des photolithographies, les résultats obtenus sont très positifs. En effet, on note que la photorésine résiste bien aux solutions utilisées pour notre gravure et par conséquent ceci engendre le profil de gravure désiré.

Cependant, plusieurs essais ont été effectués pour aboutir à un résultat satisfaisant. En outre, on a effectué des essais de gravure selon deux orientations cristallines différentes (101) et (110) et ceci pour observer la corrélation qui peut exister entre l'orientation cristalline et les solutions de gravure utilisées.

La figure 4.4 illustre le profil du matériau laser après une minute de gravure dans la solution KKI composée d': acide acétique: HCl: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: H<sub>2</sub>O (40 :20 :3 :15) et refroidie à 10°C. Ce profil obtenu au profilomètre nous indique la profondeur gravée après une minute et qui est de l'ordre de 1810 nm dans ce cas. En effet, pour aboutir à une valeur juste de la profondeur gravée, il faut soustraire l'épaisseur de l'oxyde pour en déduire le taux de gravure de la solution KKI dans les hétérostructures.

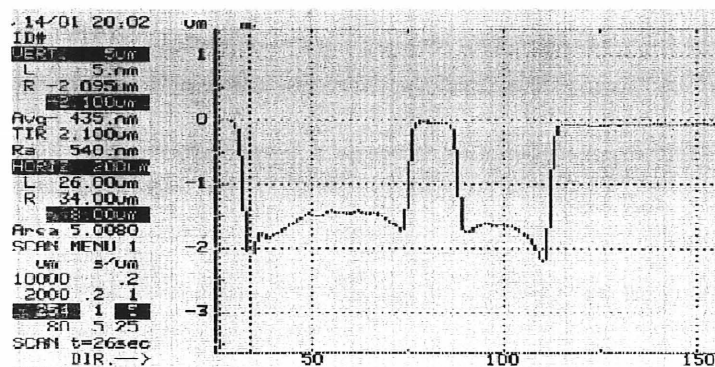


Figure 4.4. Profil du matériau laser après une minute de gravure au KKI.

La figure 4.5 illustre le profil de la crête après une gravure d'une minute à la solution KKI. On peut en déduire que le profilomètre n'est pas capable de nous donner l'allure exacte du profil suite à la gravure et ceci à cause de sa pointe de forme triangulaire et qui risque de nous donner une fausse idée sur le profil. C'est pourquoi, on a adopté l'imagerie en électrons secondaires comme moyen efficace et sûr pour observer l'allure du profil suite à chaque étape de gravure.

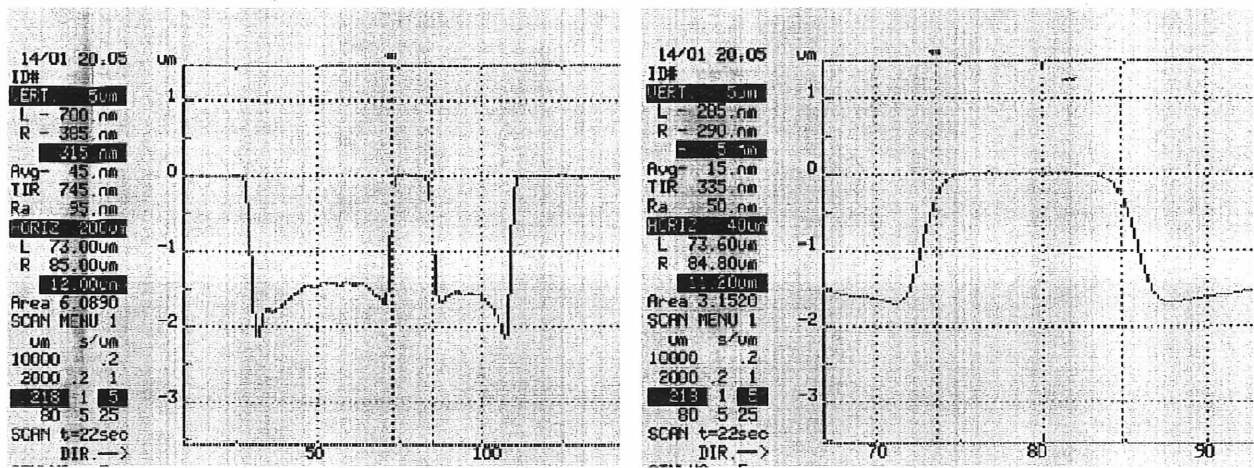


Figure 4.5. Profil et largeur de la crête.

La gravure à la solution KKI représente la première étape du procédé de gravure, en effet, la solution KKI permet d'avoir des parois arrondies et inclinées. Cependant, une deuxième solution de gravure est nécessaire pour rendre les parois plus verticales.

La deuxième solution se compose de :  $H_3PO_4/HCl$  et elle est utilisée à température ambiante. Cette solution se distingue par un taux de gravure assez faible de l'ordre de 435 nm/min. La figure 4.6 présente le profil du matériau laser après une minute de gravure dans la solution de peroxyde d'hydrogène et d'acide chlorhydrique.

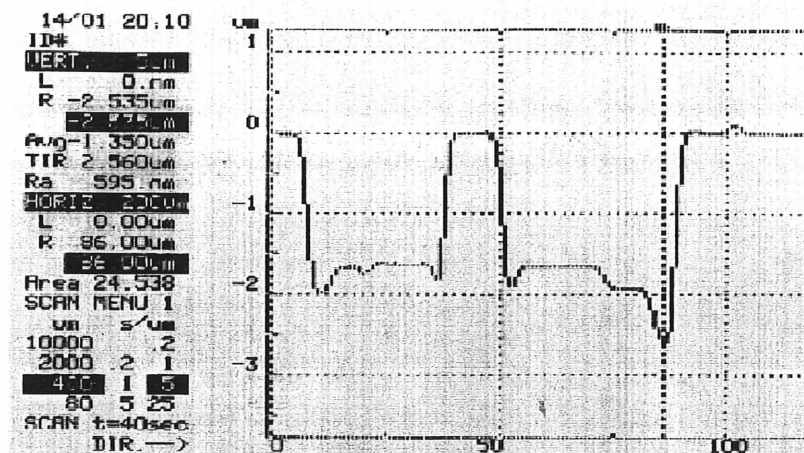


Figure 4.6. Profil du matériau laser après une minute de gravure à la solution  $H_3PO_4/HCl$ .

On observe que le profil de la gravure est presque le même que celui de la première gravure. Ceci prouve qu'on ne peut pas suivre l'évolution du profil à chaque étape du procédé avec le profilomètre. Cependant, on peut conclure la profondeur de la gravure et par conséquent déduire le taux de gravure de chaque solution. La figure 4.7 illustre la largeur de la crête après une minute de gravure à la solution  $H_3PO_4/HCl$ . En effet, on remarque que la largeur de la crête après les deux étapes de gravure atteint une largeur comprise entre 10 et 11  $\mu m$  ce qui est une valeur très satisfaisante pour nos travaux.

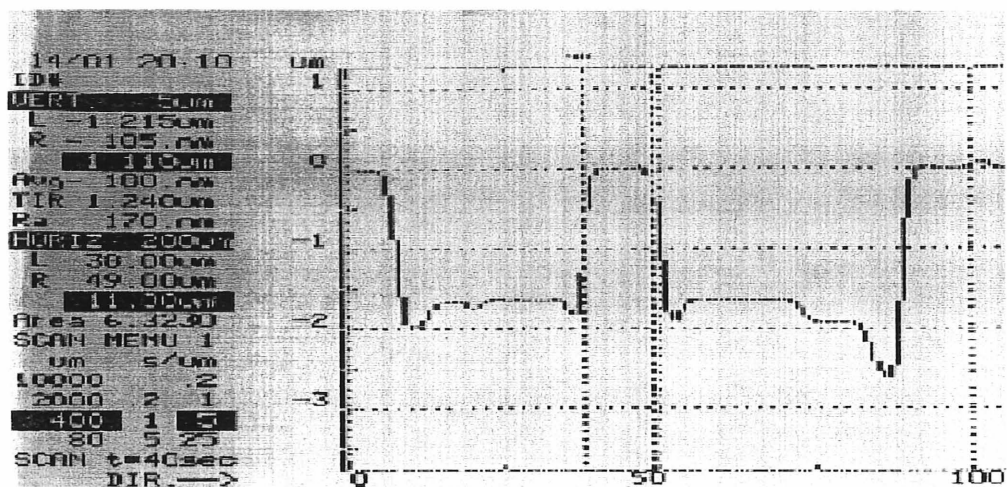


Figure 4.7. Profil et largeur de la crête.

Pour observer de près les détails de la gravure, on a effectué des séries de photos au microscope électronique. En effet, on a observé les échantillons qui ont subi une gravure humide suivant l'orientation cristalline (110) et les résultats de ces observations sont illustrés par la figure 4.8.

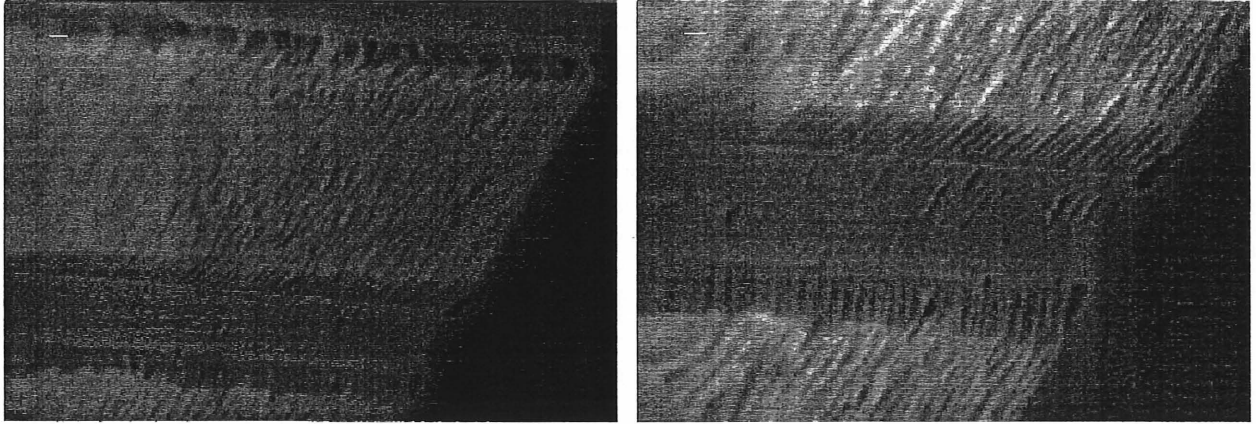


Figure 4.8. Profil du matériau laser suite à une gravure humide selon l'orientation cristalline 110.

Les photos de la figure 4.8 montrent que suivant l'orientation cristalline 110, les parois de la crête ne sont pas tout à fait verticales. Cependant, on a réalisé des essais de gravure selon l'orientation cristalline 111. Les résultats de ces essais sont présentés par la figure 4.9.

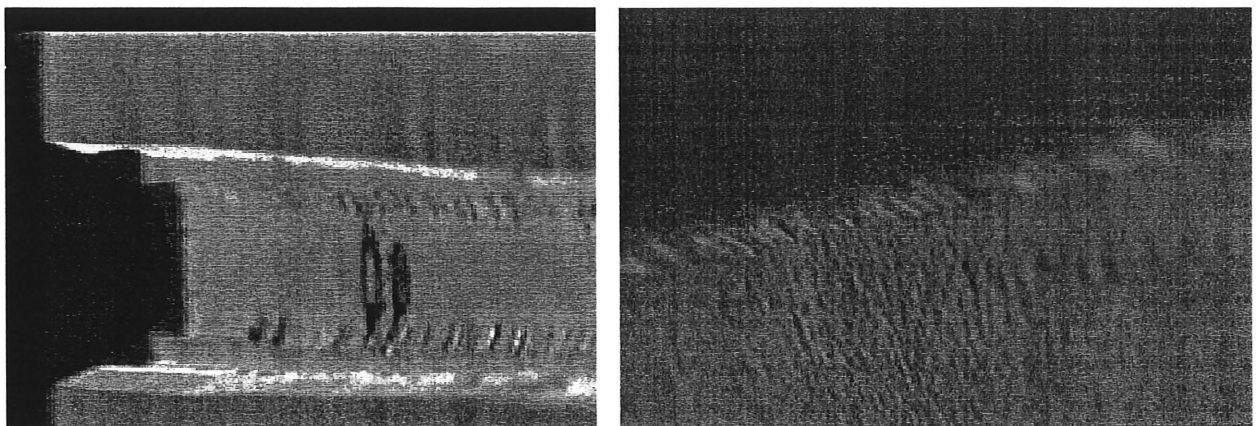


Figure 4.9. Profil du matériau laser suite à une gravure humide selon l'orientation cristalline 111.

Les photos de la figure 4.9 montrent que suivant l'orientation cristalline 111, les parois de la crête sont verticales et ceci prouve que le choix de la technique de lithographie ainsi que l'orientation cristalline adéquate suivant laquelle on réalise la gravure humide dans les hétérostructures, sont deux critères fondamentaux pour obtenir des résultats positifs.

La deuxième partie de ces travaux consiste à fabriquer des diodes lasers avec des différentes largeurs de lignes d'injection. Cette partie du projet consiste à analyser l'effet de la largeur de la ligne d'injection sur le courant de seuil du dispositif, interpréter les limites de cette méthode sur les courants de seuil et prouver la nécessité d'utiliser les différentes méthodes de gravure.

### **4.3. Fabrication des diodes lasers à différentes largeurs de lignes**

Au cours de cette étape de fabrication, les diodes lasers ont subi une photolithographie. Le matériau laser 97 138 a passé par toutes les étapes nécessaires à la fabrication. À cette étape du projet, on a utilisé trois échantillons du même matériau laser et ceci en appliquant à chaque fois un masque de largeur de ligne différente. Le premier échantillon représentait des lignes de 20 à 30 $\mu$ m, le second des lignes de 30 à 40 $\mu$ m et le dernier des lignes de 7 à 8 $\mu$ m. En outre, la gravure humide se fait seulement dans l'oxyde de silicium.

#### **4.3.1. Lasers à 27 $\mu$ m de largeur de ligne**

La fabrication est réalisée à l'aide des masques qu'on ignorait exactement les largeurs des lignes, c'est pourquoi après la fabrication complète des lasers, on a eu recours à l'imagerie en électrons secondaires du microscope électronique à balayage pour pouvoir mesurer exactement la largeur des lignes d'injection et pouvoir conclure



les effets au niveau du courant de seuil. De ce fait, la figure qui suit présente l'image prise au MEB d'un laser dont la largeur de ligne est de  $27\text{ }\mu\text{m}$ .

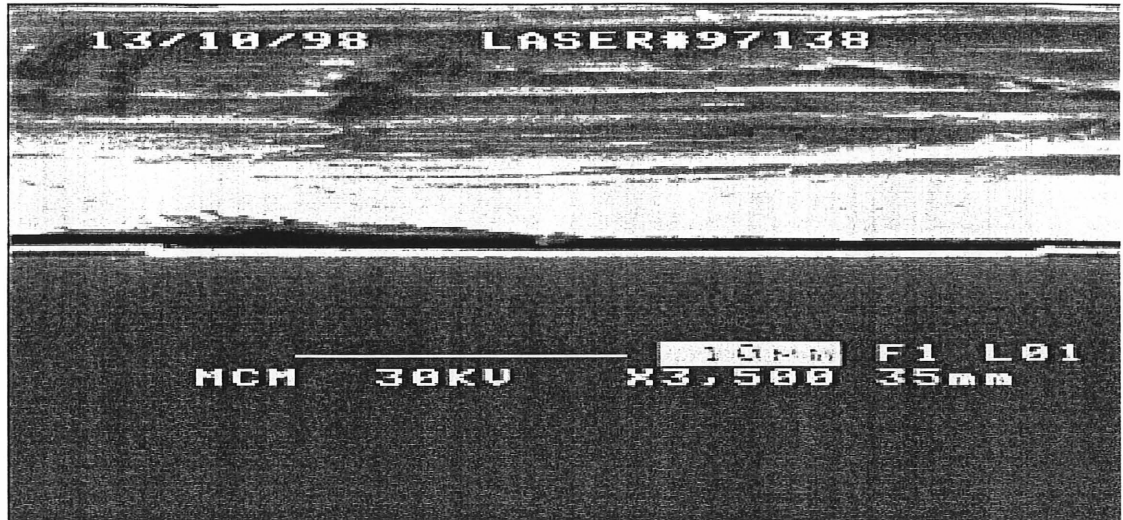


Figure 4.10. Vue de face d'un laser à  $27\text{ }\mu\text{m}$  de largeur de ligne d'injection.

Une fois la largeur de la ligne d'injection est mesurée, on a réalisé des tests électriques et ceci en mesurant la caractéristique I-V dans le but de s'assurer de la bonne résistivité des contacts métalliques.

Ensuite, on a mesuré la caractéristique L-I ou la puissance lumineuse versus le courant d'injection en utilisant le montage optique du département de physique de l'Université de Sherbrooke. Ces mesures nous ont permis de faire des interprétations au niveau du courant de seuil. La figure qui suit présente la caractéristique L-I d'une diode laser dont la largeur de ligne est de  $27\text{ }\mu\text{m}$ .

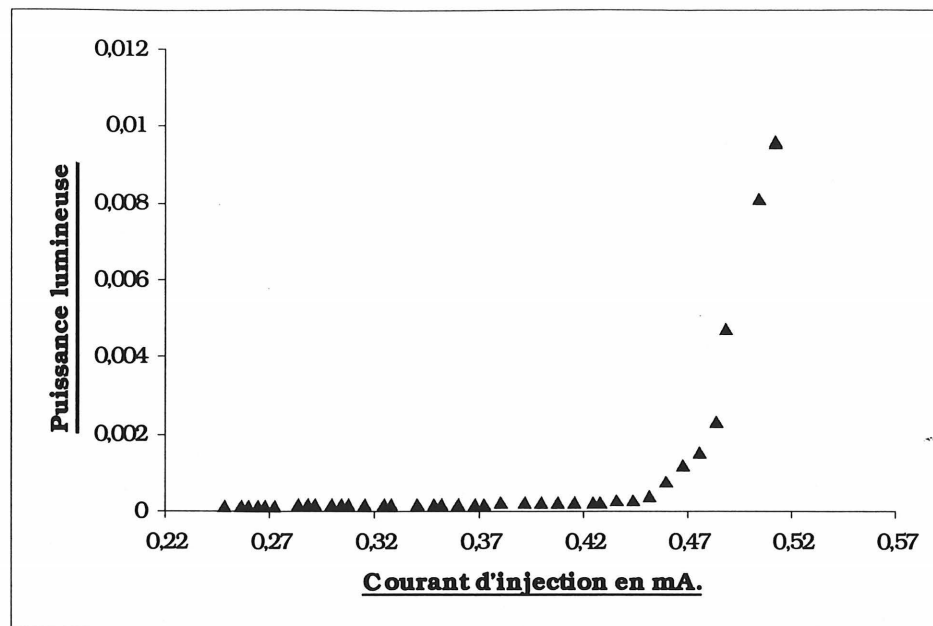


Figure 4.11. Caractéristique L-I d'une diode laser de 27µm de largeur de ligne d'injection.

#### 4.3.2. Lasers à 30 µm de largeur de ligne

Les diodes lasers de 30 µm de largeur de ligne d'injection sont fabriquées dans les mêmes conditions que les précédentes pour comparer leurs performances. La figure qui suit illustre l'image prise au MEB d'un laser dont la largeur de ligne est de 30 µm.

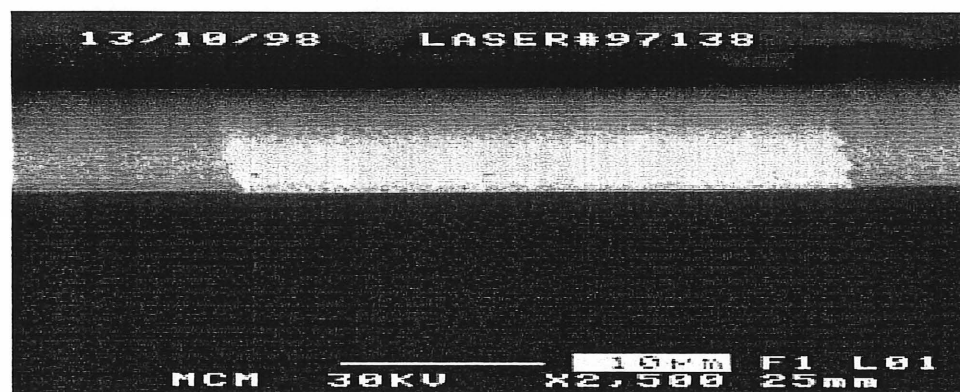


Figure 4.12. Vue de dessus d'un laser à 30 µm de largeur de ligne d'injection.



Une fois la largeur de la ligne d'injection est mesurée, on a réalisé les mêmes tests électriques que précédemment.

Ensuite, on a mesuré la caractéristique de la puissance lumineuse versus le courant d'injection. Ces mesures nous ont permis de faire des interprétations au niveau du courant de seuil. La figure qui suit présente la caractéristique L-I d'une diode laser dont la largeur de ligne est de 30  $\mu\text{m}$ .

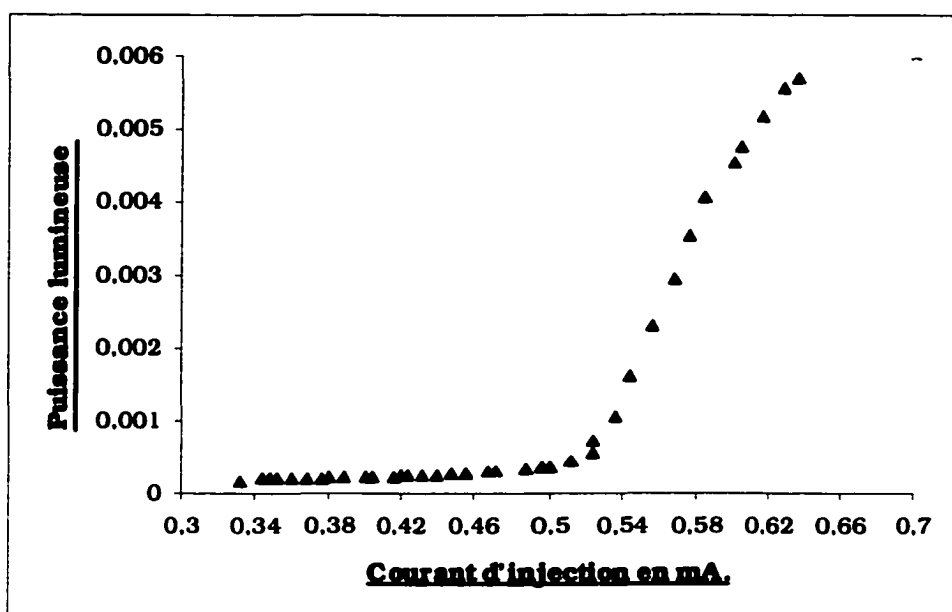


Figure 4.13. Caractéristique L-I d'une diode laser de 30  $\mu\text{m}$  de largeur de ligne d'injection.

#### 4.3.3. Lasers à 8.3 $\mu\text{m}$ de largeur de ligne

Les diodes lasers de 8.3  $\mu\text{m}$  de largeur de ligne d'injection sont réalisées dans les mêmes conditions que les précédentes et ceci pour pouvoir comparer leurs performances, la figure qui suit illustre l'image prise au MEB d'un laser dont la largeur de ligne est de 8.3  $\mu\text{m}$ .



Figure 4.14. Vue de dessus d'un laser à  $8.3\ \mu\text{m}$  de largeur de ligne d'injection.

Après avoir mesuré la largeur de la ligne d'injection, on a réalisé des tests électriques et on a mesuré la caractéristique de la puissance lumineuse versus le courant d'injection.

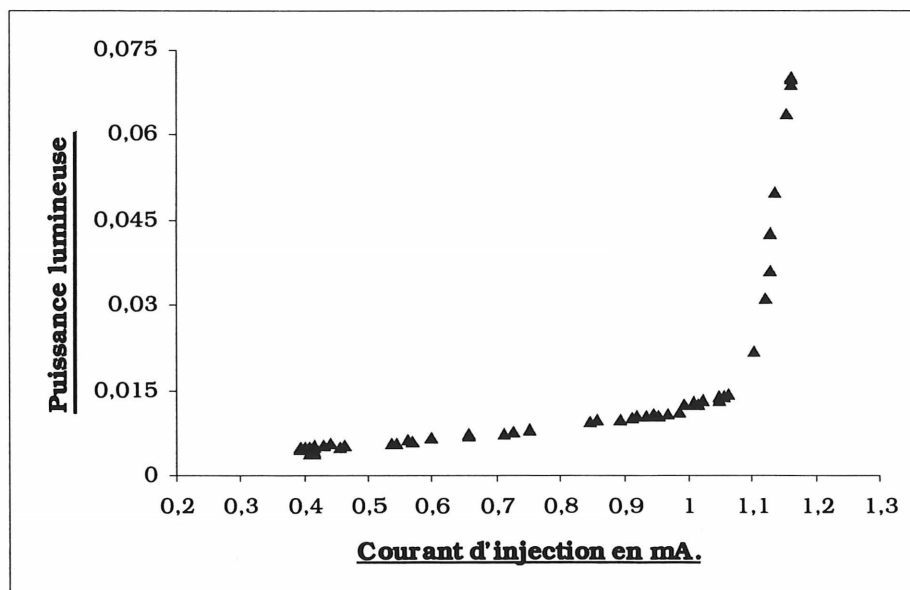


Figure 4.15. Caractéristique L-I d'une diode laser de  $8.3\ \mu\text{m}$  de largeur de ligne d'injection.

#### 4.3.4. Interprétations

D'après les caractéristiques L-I, on remarque que le courant de seuil diminue proportionnellement avec la largeur de la ligne d'injection du courant. En effet, le courant de seuil est de l'ordre de 450 mA pour les lasers de largeur de lignes d'injection de 27  $\mu\text{m}$  et de 520 mA pour les lasers de largeur de lignes d'injection de 30  $\mu\text{m}$ . Cependant, pour les lasers de largeur de lignes d'injection de l'ordre de 8  $\mu\text{m}$ , le courant de seuil est assez élevé : de l'ordre de 1100 mA. En effet, pour des lasers de largeurs de lignes d'injection inférieures à 10  $\mu\text{m}$ , des pertes latérales apparaissent ce qui engendre l'augmentation du courant de seuil. Ceci prouve qu'il faut adopter d'autres procédés de fabrication telle que la gravure humide pour pouvoir ouvrir des raies d'injection dans le laser inférieures à 10  $\mu\text{m}$  de façon que le dispositif laser fonctionne d'une manière monomodale tout en ayant des courants de seuil assez bas.

#### 4.4. Mesures des distributions spatiales de l'intensité lumineuse

La distribution spatiale de l'intensité lumineuse présente l'une des caractéristiques du mode spatial d'un laser semiconducteur. En effet, si on mesure la distribution spatiale de l'intensité lumineuse émise près des facettes du laser, on dit qu'on effectue *des mesures de distribution de l'intensité lumineuse en champ proche*. D'autre part, les mesures de distribution spatiale de l'intensité lumineuse réalisées loin des facettes du laser sont appelées *des mesures de distribution de l'intensité lumineuse en champ lointain*. Les dimensions du faisceau lumineux ainsi que les angles de divergence parallèles ou perpendiculaires au plan de la jonction laser sont des paramètres fondamentaux associés au mode laser.

En outre, on a réalisé un montage illustré par la figure 4.16 capable de mesurer les distributions spatiales de l'intensité lumineuse en champ lointain et en champ proche. Le montage se compose d'un disque gradué capable de nous donner des angles de distribution au demi degré près, d'une tige métallique de longueur 25 cm ou 12.5 cm,

d'une pince laser montée sur un support, d'un détecteur, et de l'appareillage électrique d'alimentation et de mesure de la puissance détectée (une source de courant pulsé, un wattmètre et un oscilloscope). La source de courant fournit un courant pulsé d'amplitude 1.4 A et de durée de pulse de 300 ns, la fréquence d'alimentation est de 10 KHz. En variant l'angle de distribution, on détecte des puissances lumineuses différentes et dépendant de la diode laser à tester. Cependant dans nos travaux, on s'est limité aux mesures de distribution en champ lointain en variant la longueur de la tige métallique reliant la diode laser émettrice au détecteur. De plus, suivant le modèle de nos diodes lasers, les angles de distribution sont parallèles au plan de la jonction laser.

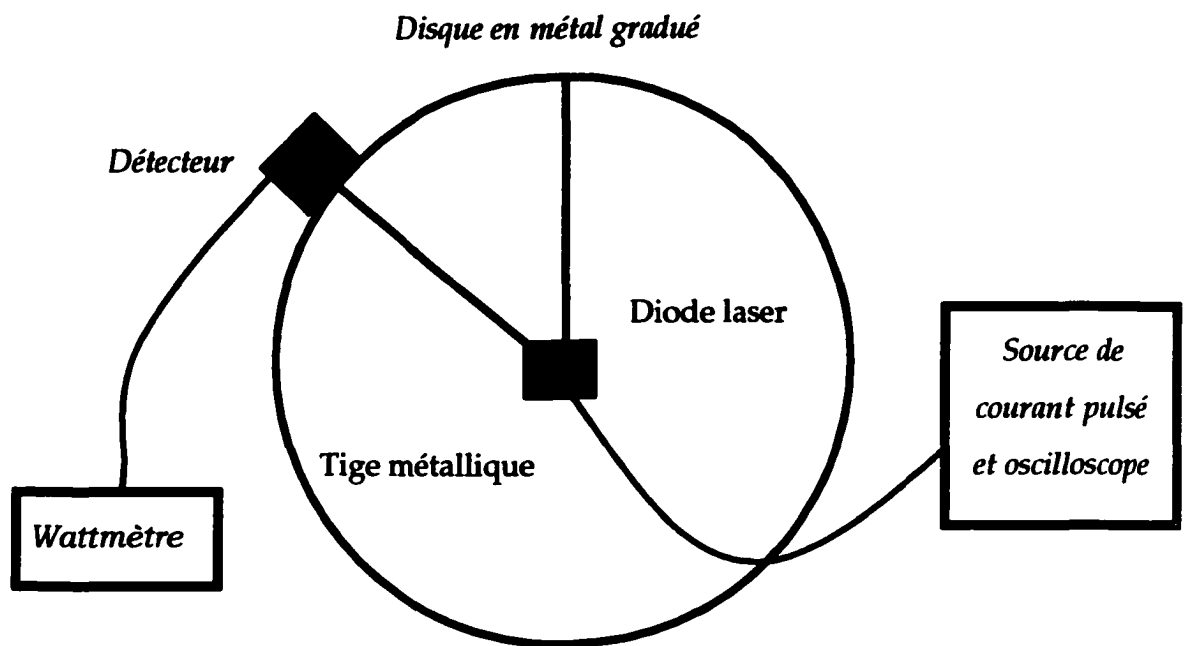


Figure 4.16. Montage de mesure des distributions spatiales de l'intensité lumineuse en champ lointain.

Lors de ce travail, on a réalisé des mesures pour les diodes lasers qu'on a fabriquées avec différentes largeurs de lignes d'injection. Les figures qui suivent illustrent le résultat des mesures effectuées sur plusieurs échantillons lasers.

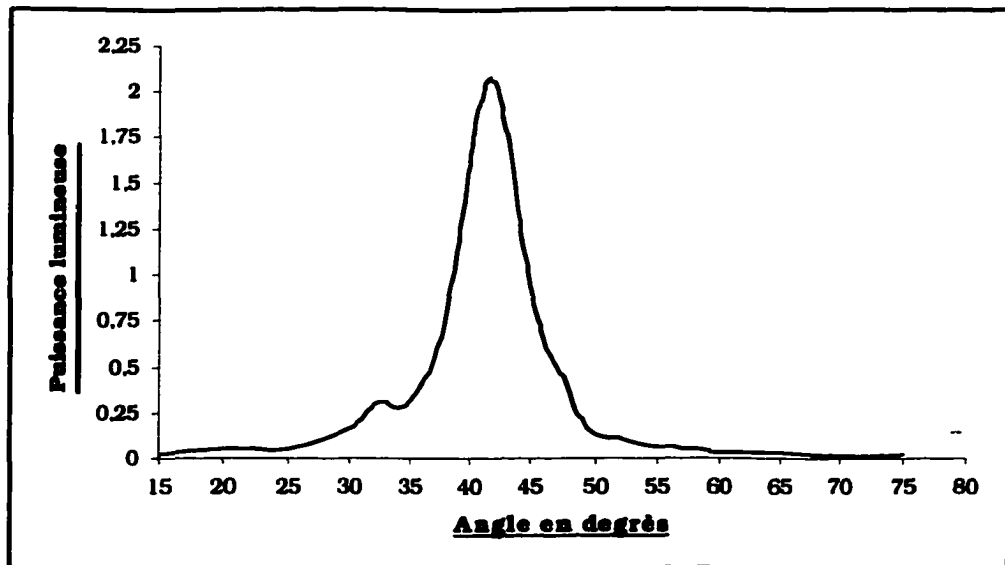


Figure 4.17. Distribution spatiale de l'intensité lumineuse en champ lointain d'un laser de 27  $\mu\text{m}$  de largeur de ligne d'injection.

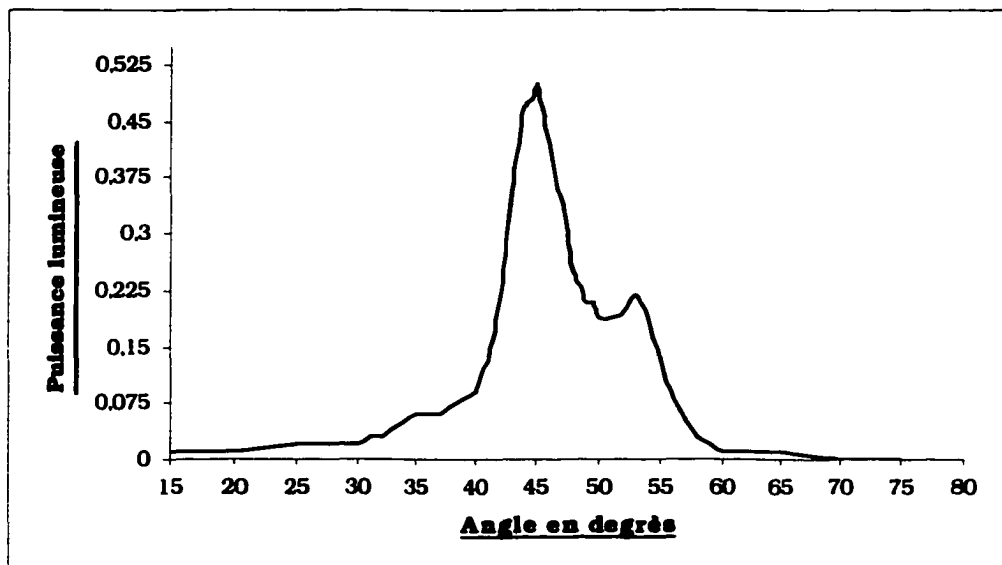


Figure 4.18. Distribution spatiale de l'intensité lumineuse en champ lointain d'un laser de 30  $\mu\text{m}$  de largeur de ligne d'injection.

Les courbes des figures 4.18 et 4.19 illustrent les distributions spatiales de l'intensité lumineuse de deux diodes lasers semiconductrices fabriquées à base d'InP (matériau 97138) et ayant deux largeurs de ligne d'injection différentes : 27  $\mu\text{m}$  et 30  $\mu\text{m}$ . On remarque que le pic s'étend de 35° à 50° pour la figure 3.18. Cependant, le pic de la figure 3.19 s'étend de 35° à 60°. On peut conclure que la largeur de la ligne d'injection et par conséquent les dimensions de la zone de confinement de la lumière influence énormément la distribution spatiale de la puissance lumineuse. En outre, plus la zone de confinement est étroite plus le pic est étroit, et plus la puissance lumineuse détectée est importante.

En deuxième partie de ce travail, on a réalisé des mesures de distributions sur une diode laser de 70  $\mu\text{m}$  de largeur de ligne d'injection et ceci en variant la distance entre la diode laser émettrice et le détecteur en utilisant deux tiges de longueurs différentes (10'' et 5''). La figure 4.19 présente les mesures réalisées avec une tige de 25 cm et la figure 4.20 présente celles effectuées avec une tige de 12.5 cm.

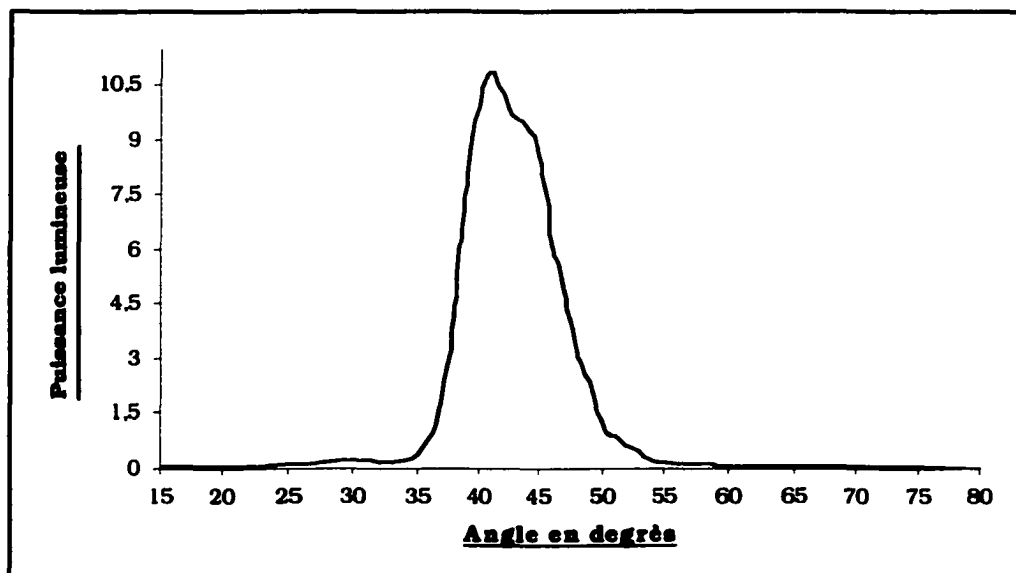
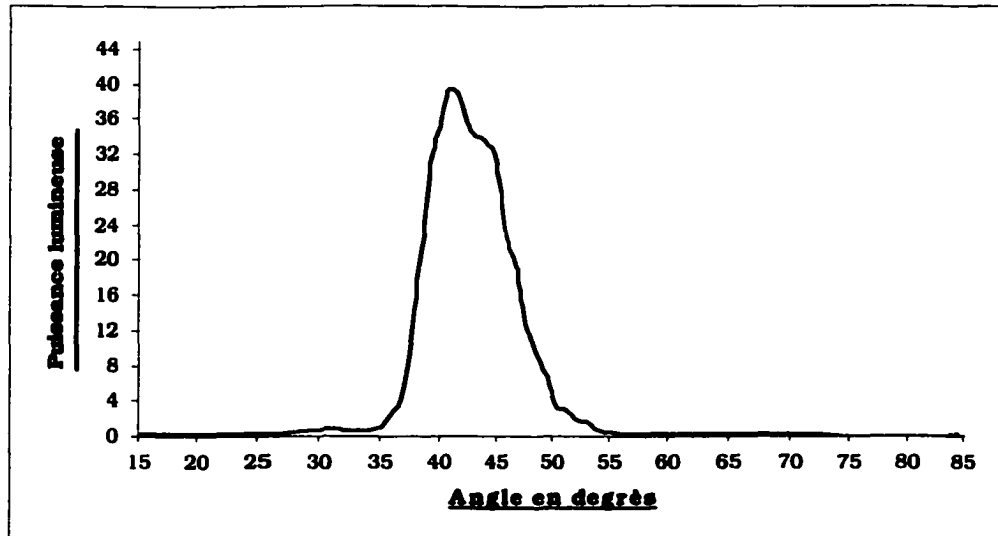


Figure 4.19. Distribution spatiale d'un laser de 70  $\mu\text{m}$  de largeur de ligne d'injection distant de 10'' du détecteur.



**Figure 4.20.** Distribution spatiale d'un laser de  $70\ \mu\text{m}$  de largeur de ligne d'injection distant de  $5''$  du détecteur.

On observe que la distribution angulaire du pic est la même pour les deux courbes, cependant la puissance détectée est beaucoup plus élevée dans le cas de la tige de  $5''$  de longueur (supérieure à 40 unités) que dans l'autre cas (environ 11 unités). On peut conclure que la variation de la distance entre l'émetteur et le détecteur affecte beaucoup plus le taux de puissance lumineuse détectée.

La distribution spatiale de l'intensité lumineuse en champ lointain est utile dans la détermination de l'efficacité de couplage entre le laser semiconducteur et la fibre optique. Mathématiquement, la distribution en champ lointain est obtenue à partir de la transformée de Fourier de la distribution en champ proche. En outre, le champ lointain latéral (parallèle au plan de la jonction laser) dépend des mécanismes de guidage latéraux.

## 4.5. Conclusion

Le long de ce chapitre, plusieurs résultats sont présentés pour valider les travaux effectués au cours de ce projet. En effet, la recette adoptée pour la gravure humide dépend du procédé lithographique et des masques utilisés. Après avoir eu recours aux

deux procédés lithgraphiques utilisés dans le Groupe de Microélectronique de l'Université de Sherbrooke, la gravure humide est réussie en adoptant la photolithographie. Cependant la fabrication des diodes lasers monomodes reste incomplète à cause des imperfections dues aux masques.

Ensuite, on a fabriqué des diodes lasers à différentes largeurs de lignes d'injection et ceci pour interpréter l'impact de la raie d'injection sur la variation du courant de seuil et pour déterminer les limites des procédés de fabrication de telles diodes lasers. Enfin, on a effectué des mesures de distribution spatiale de l'intensité lumineuse des diodes lasers fabriquées et ceci à l'aide d'un montage réalisé dans le département de physique de l'Université de Sherbrooke. Le montage est capable de mesurer les distributions spatiales de la puissance lumineuse en champ lointain et en champ proche, ce qui est très avantageux si on veut analyser les caractéristiques spatiales des modes lasers. La mise en fonction de ce montage permettra donc d'améliorer la caractérisation des diodes lasers dans des travaux subséquents.



## CONCLUSION

Le développement du procédé de la gravure humide exposé le long de ce mémoire s'avère une technique prometteuse pour la fabrication des diodes lasers monodes ayant des courants de seuil assez bas. En effet, de tels dispositifs ont une tolérance importante des températures élevées de fonctionnement et des possibilités de pouvoir les alimenter avec des courants continus. En outre, grâce à cette méthode de gravure, on peut fabriquer d'autres dispositifs photoniques tels que les modulateurs et les guides d'ondes tout en les intégrant aux diodes lasers sur un même circuit.

Le long de ce projet, on a accordé un intérêt particulier à la gravure humide et aux différents procédés de fabrication et en particulier la lithographie par faisceaux d'électrons et la photolithographie. Cependant, pour pouvoir valider la réussite de la gravure humide, il va falloir améliorer la qualité des masques adoptés pour la photolithographie ainsi que ceux conçus par la lithographie par faisceaux d'électrons. De plus, il est possible de combiner les avantages de la gravure humide aux méthodes d'interdiffusion des puits quantiques telle que l'implantation ionique et ceci dans le but de concevoir des dispositifs lasers monolithiques monomodes fonctionnant à des longueurs d'ondes de l'ordre de 1.55 nm.

La seconde partie de ce projet consistait à fabriquer des diodes lasers de différentes largeurs de raies d'injection, de les caractériser et d'étudier la limite de la diminution de leur courant de seuil en fonction de la largeur de la raie d'injection. Enfin, pour interpréter la variation de la distribution spatiale de la puissance lumineuse, on a réalisé un montage capable de mesurer les distributions spatiales de l'intensité lumineuse en fonction de l'angle de distribution.

## Références

AGRAWAL, GP., DUTTA, NK. (1993) *Semiconductor Lasers*, AT&T, 620 p.

BARRAU, J., BROUSSEAU, B., BROUSSEAU, M., SIMES, R., GOLDSTEIN, L. (Avril 1992) *Novel Principle of Confinement in Quantum-Well Structures*, ELECTRONICS LETTERS, Vol 28, n° 8, p 786-788.

BOCHE, B., MULLER, R., BOHM, G., TRANKLE, G., WEIMANN, G. (Décembre 1996) *Monolithic Integration of GaAs-AlGaAs Quantum-well Lasers with Directional Couplers using vertical coupling of light*, IEEE Photonics Technology Letters, Vol 8, n° 12, p 1591-1593.

CHING-TING, L., HUNG-PIN, S., NIEN-TZE, Y., CHANG-DA, T., YEN-TANG, L., YUAN-KUANG, T. (1997) *Thermal reliability and characterization of InGaP Schottky contact with Ti/Pt/Au metals*, Solid-State Electronics, Vol 41, n° 1, p 1-5.

CHING-TING, L., MOU-HSIEN, L., CHANG-DA, T. (1997) *Improved performances of InGaP Schottky contact with Ti/Pt/Au metals and MSM Photodetectors by (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>x</sub> treatment*, Solid-State Electronics, Vol 41, n° 11, p 1715-1719.

COLDREN, L., FURUYA, K., MILLER, B., RENTSCHLER, J. (Octobre 1982) *Etched Mirror and Groove-Coupled GaInAsP/InP Laser Devices for Integrated Optics*, IEEE Journal of QUANTUM ELECTRONICS, Vol 18, n° 10, p 1679-1688.

FOROUHAR, S., KSENDZOV, A., LARSSON, A., TEMKIN, H. (Juillet 1992) *InGaAs/InGaAsP/InP Strained-Layer Quantum Well Lasers At ~2  $\mu$ m*, ELECTRONICS LETTERS, Vol 28, n° 15, p 1431-1432.

FOURRE, H., DIETTE, F., CAPPY, A. (Septembre 1996) *Selective wet etching of lattice-matched InGaAs/InAlAs on InP and metamorphic InGaAs/InAlAs on GaAs using succinic acid/hydrogen peroxide solution*, J.Vac.Sci. Technol, Vol 14, p 3400-3402.

GARBUZOV, D., SHIAU, G., BULOVIC, V., BORODITSKY, M., CHAO, C., FORREST, S. (Mars 1995) *Photoluminescence study of excess carrier spillover in 1.3  $\mu$ m wavelength strained multi-quantum-well InGaAsP/InP laser structures*, Appl.Phys.Lett, Vol 66, n° 11, p 1307-1309.

HIGUCHI, K., UCHIYAMA, H., SHIOTA, T., KUDO, M., MISHIMA, T. (Décembre 1996) *Selective wet-etching of InGaAs on InAlAs using adipic acid and its application to InAlAs/InGaAs HEMTs*, Semicond. Sci. Technol, Vol 12, p 475-480.

ILS, P., MICHEL, M., FORCHEL, A., GYURO, I., SPEIER, P., ZIELINSKI, E. (1994) *Fabrication of ultrasmall InGaAs/InP nanostructures by high voltage electron beam lithography and wet chemical etching, NONLITHOGRAPHY : A Borderland between STM, EB, IB, and X-Ray Lithography, p 77-80.*

ISHIKAWA, J., ITO, T., OH-ISO, Y., YAMAMOTO, M., SHIN-ICHI, N., TAKAHASHI, KURITA, S. (Mai 1989) *Lasing characteristics of 0.8- $\mu$ m InGaAsP/GaAs lasers fabricated by wet chemical etching, J. Appl. Phys., Vol 65, n° 10, p 3767-3772.*

ISSANCHOU, O., BARRAU, J., MARIE, X., EMERY, J., FORTIN, C., GOLDSTEIN, L. (Décembre 1997) *Theoretical Optimization of V-Shaped GaInAsP Quantum-Well Lasers Grown on InP Substrates, IEEE Journal of QUANTUM ELECTRONICS, Vol 33, n° 12, p 2277-2281.*

ITO, T., ISHIKAWA, J., SUBE, M., TAKAHASHI, N., KURITA, S. (Mars 1987) *Internal Loss and Gain Factor of InGaAsP/GaAs Laser, Japanese journal of Applied Physics, Vol 26, n° 3, p 501-502.*

KASUKAWA, A., IWAI, N., NAMEGAYA, T., KIKUTA, T. (Décembre 1992) *Very low threshold current 1.3 $\mu$ m InAs<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub>/InP BH strained-layer quantum well laser diodes grown by MOCVD, ELECTRONICS LETTERS, Vol 28, n° 25, p 2351-2353.*

KJELLBERG, T., NILSON, S., KLINGA, T., BROBERG, B., SCHATZ, R. (Septembre 1993) *Investigation on the Spectral Characteristics of DFB Lasers with Different Grating Configurations Made by Electron-Beam Lithography, Journal Of Lightwave Technology, Vol 11, n° 9, p 1405-1415.*

KLINGSHIRN, C. (1995) *Semiconductor optics*, Springer-Verlag, 645 p.

KUHN, J., GENG, C., SCHOLZ, F., SCHWEIZER, H. (Septembre 1997) *Low-threshold GaInP/AlGaInP ridge waveguide lasers, ELECTRONICS LETTERS, Vol 33, n° 20, p 1707-1708.*

LI, G., YUAN, S., TAN, H., LIU, X., CHUA, S., JAGADISH, C. (June 1998) *In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs Quantum Well Laser with C Doped Cladding and Ohmic Contact Layers, Journal Of Electronic Materials, Vol 27, n° 9, p L61-L63.*

MATHIEU, H. (1996) *Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques*, Masson, Paris, 457 p.

MENDEZ, EE., Klitzing, KV. (1987) *Physics and Applications of Quantum Wells and Superlattices*, Plenum Press, New York, 489 p.

MERZ, L., LOGAN, R. (Août 1976) *GaAs double heterostructure lasers fabricated by wet chemical etching, Appl.Phys.Lett., Vol 47, n° 8, p 3503-3509.*

MONK, DG., SOANE, DS., HOWE, RT. (1993) *Determination of the etching Kinetics for the hydrofluoric acid/silicon dioxide system*, J. Electrochem Soc, n° 140, p. 2339-2342

PALAIS, J. (1998) *Fiber optic communications*, Fourth edition, Prentice Hall, 580 p.

PAQUETTE, M., AIMEZ, V., BEAUVAIS, J., BEERENS, J., POOLE, P., CHARBONNEAU, S., ROTH, A. (Décembre 1997) *Blueshifting of InGaAsP/InP Laser diodes by low-energy ion implantation*, Appl.Phys.Lett, Vol 71, p 3749-3751.

PERKOVITZ, S. (1993) *Optical Characterization of Semiconductors : Infrared, Raman, and Photoluminescence Spectroscopy*, ACADEMIC Press LIMITED, 345 p.

PETER, S., ZORY, J. (1993) *Quantum well lasers*, University of Florida, 560 p.

PIERRET, R. (1996) *Semiconductor Device Fundamentals*, School of Electrical and Computer Engineering Purdue University. Addison-Wesley, 465 p.

SCHRODER, DK. (1990) *Semiconductor material and device characterization*, Arisona State University, 380 p.

SCOT RUSKA, W. (1987) *Microelectronic processing :An introduction to the manufacture of integrated circuits*, Intel Corporation Livermore California, 340 p.

STRADLING, RA., KLIPSTEIN, PC. (1990) *Growth and Characterisation of semiconductors*, Imperial College of Science, Technology and Medicine, IOP Publishing Ltd, 287 p.

STREETMAN, BG. (1995), *Solid State Electronic Devices*, Microelectronics Research Center, Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Texas at Austin, 467 p.

STREIFER, W., ETTENBERG, M. (1991) *Semiconductor Diode Lasers : Volume I*, The Institute of electrical and Electronics Engineers, 589 p.

TENNANT, D., KOCH, T., VERDIELL, J., FEDER, K., GNALL, R., KOREN, U., YOUNG, M., MILLER, B., NEWKIRK, A., TELL, B. (Novembre 1993) *Multiwavelength distributed Bragg reflector laser array fabricated using near field holographic printing with an electron-beam generated phase grating mask*, J.Vac.Sci. Technol, Vol 11, p 2509-2513.

TIBERIO, R., CHAPMAN, P., MARTIN, R., FOROUHAR, S., LANG, R. (Novembre 1994) *Laterally coupled distributed feedback laser fabricated with electron-beam lithography and chemically assisted ion-beam etching*, J.Vac.Sci. Technol, Vol 12, p 3746-3749.

TOSHIO, K., CHIYUKI, K., KENICHI, I. (Janvier 1980) *Chemical Etching of InP and GaInAsP for Fabricating Laser Diodes and Integrated Optical Circuits*, Japanese journal of Applied Physics, Vol 19, n° 1, p 79-85.

TSANG, WT. (1985) *Semiconductors and semimetals :Lightwave Communications Technology*, At & Bell Laboratories Holmdel, New Jersey, 324 p.

UCHIDA, T., YOKOUCHI, N., MIYAMOTO, T., INABA, Y., KOYAMA, F., IGA, K. (Mars 1992) *GaInAsP/InP surface emitting lasers grown by chemical beam epitaxy*, ELECTRONICS LETTERS, Vol 28, n° 6, p 550-553.

UNGER, P., BOEGLI, V., BUCHMANN, P., GERMANN, R. (1994) *High-resolution electron-beam lithography for fabricating visible semiconductor lasers with curved mirrors and integrated holograms*, Microelectronic Engineering, Vol 23, p 461-464.

VAPAILLE, A., CASTAGNÉ, C. (1990) *Dispositifs et circuits intégrés semi-conducteurs : physique et technologie*, BORDAS, Paris, 465 p.

ZAVADIL, J., STAROSTA, K. (1997) *Guided modes in spontaneous edge electroluminescence from GaInAsP/InP heterostructures diodes*, Journal of LUMINESCENCE, Vol 74, p 1007-1009.